Benjamin Krick

Untersuchung von Strohballen und Strohballenkonstruktionen hinsichtlich ihrer Anwendung für ein energiesparendes Bauen unter besonderer Berücksichtigung der lasttragenden Bauweise

kassel
university
press

Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich Architektur, Stadt- und Landschaftsplanung der Universität Kassel als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) angenommen.

Erster Gutachter:	Prof. em. Dr.-Ing. Gernot Minke
Zweiter Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Oliver Hensel
Prüfer	Prof. Dr.-Ing. Anton Maas
	Prof. Dipl.-Ing. Manfred Grohmann

Tag der mündlichen Prüfung 3. Juni 2008

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar

Zugl.: Kassel, Univ., Diss. 2008
ISBN 978-3-89958-422-6
URN: urn:nbn:de:0002-4227

Druck und Verarbeitung: Unidruckerei der Universität Kassel
Printed in Germany

Dank

Die vorliegende Arbeit entstand in wesentlichen Zügen während meiner Zeit als freier wissenschaftlicher Mitarbeiter am Forschungslabor für Experimentelles Bauen (FEB) des Fachbereichs Architektur an der Universität Kassel.

Meinem Doktorvater Univ. Prof. em. Dr.-Ing. Gernot Minke danke ich herzlich für die fördernde Betreuung, für kritische Diskussionen, für vielfach erwiesene Hilfsbereitschaft, für die Möglichkeit Praxiserfahrungen im experimentellen Strohballenbau zu sammeln und für sein immer offenes Ohr.
Dem Techniker des FEB, Herrn Frank Millies danke ich für die vielen praktischen Tipps und Hilfen insbesondere beim Bau von Prüfständen und für seine Geduld und Nachsicht. Dank gilt ebenso der ehemaligen wissenschaftlichen Hilfskraft und jetzigen wissenschaftlichen Mitarbeiterin Dipl.-Ing. Saskia Skalay für ihre Unterstützung.

Meinem Zweitbetreuer Univ. Prof. Dr.-Ing. Oliver Hensel danke ich herzlich für seine stete Ansprechbarkeit und Hilfe, für die Möglichkeit, Strohballen zu pressen und dabei wertvolle Erfahrungen zu sammeln, für die vielen Einblicke in die Welt der Agrartechnik und Landwirtschaft, für die Möglichkeit durch Lehren zu lernen und besonders für die kritische Durchsicht meiner Texte.
Mein Dank gilt auch den Mitarbeitern der FG Agrartechnik Christian Schellert und Heiko Tostmann für die Unterstützung beim Strohballenpressen. Marco Tamm und Dr. Christian Krutzinna danke ich für die Möglichkeit der Strohballenlagerung in der Staatsdomäne Frankenhausen
Durch die Betreuung der Diplomarbeit von Dipl.-Ing. Timo Struwe (Struwe 2007) erhielt ich viele Anregungen. Ihm sei für seine Mitarbeit bei den elastomechanischen Tests sowie für anregende Diskussionen und wertvolle Informationen gedankt.

Herrn Univ. Prof. Dr.-Ing. Ekkehard Fehling, seinem wissenschaftlichen Mitarbeiter Jochen Stürtz und den Mitarbeitern der MPA Kassel möchte ich für die Unterstützung bei den ersten elastomechanischen Tests danken.

Mein Dank gilt ebenso meiner wissenschaftlichen Hilfskraft Luzia Rux für ihre Hilfe bei der Durchführung und Vorbereitung elastomechanischer Tests und Jonathan Blanz für seine unersetzliche Hilfe bei der Programmierung und dem Aufbau der Steuerungen und Datenlogger für die Prüfstände zum elastomechanischen Verhalten von Strohballen und Wänden aus Strohballen.

Die Strohballenbauerinnen Frederike Fuchs und Britta Imhoff halfen beim Aufbau von Testwänden und gaben viele wertvolle Informationen zur Strohballenbaupraxis. Dafür und für anregende Diskussionen sei ihnen gedankt.
Mein herzlicher Dank gilt Dirk Scharmer für die Hilfe bei der Quellensuche, für viele anregende und kritische Telefonate, für den wertvollen Austausch und für die erwiesene Freundschaft.

Danken möchte ich auch Univ. Prof. Dr.-Ing. Anton Maas für die kritische Durchsicht des bauphysikalischen Teils der Arbeit und für Hilfestellungen bei bauphysikalischen Fragen.

Weiterhin gebührt Dipl.-Phys. Jürgen Schnieders von Passivhaus Institut Darmstadt Dank für seinen Rat zur Einarbeitung von Korrekturen.

Mein besonderer Dank gilt meiner lieben Mutter für die orthographische Korrektur aller Texte.
Meinen Freunden Dr.-Ing. Luise Spiske, Dr. Astrid Wiemann und Dr. Sebastian Wolf möchte ich herzlich für die kritische und geduldige Durchsicht und Auseinandersetzung mit meinen Texten sowie für die fruchtbaren Diskussionen danken. Frank Küpper bin ich für die Unterstützung bei der Übersetzung der Zusammenfassung ins Englische dankbar.

Während meiner Dissertation wurde ich durch das Cusanuswerk, die Bischöfliche Studienstiftung, finanziell wie ideell unterstützt. Mein Dank gilt allen, die diese Förderung ermöglichten.

Zusammenfassung

Der Strohballenbau gilt als ökologisch und ökonomisch vielversprechende Bauweise, deren Verbreitung aufgrund unzureichender Kenntnisse gehemmt ist. Diese Dissertation möchte zur Erweiterung der Kenntnisse im Strohballenbau und damit zur seiner Verbreitung beitragen.

Im Rahmen der Arbeit wurden die hygroskopischen Sorptionseigenschaften verschiedener Strohsorten untersucht und Gleichungen zur Bestimmung des massespezifischen Feuchtegehaltes nach der BET-Theorie aufgestellt.

Der Einsatz von Strohballen mit stark geschädigter Halmstruktur sollte vermieden werden bzw. auf den Einsatz in nicht lasttragenden Konstruktionen beschränkt bleiben. Mähdrescher mit axialem Dreschwerk wirken sich negativ auf die Halmstruktur aus und sollten nicht zum Dreschen von Baustroh verwendet werden. Praxistests zeigten, dass mit marktüblichen HD-Ballenpressen unter Optimierung der Pressbedingungen Baustrohballen mit ausreichender Qualität produziert werden können, Verbesserungen an den Maschinen sind jedoch wünschenswert. Quaderballen können in besserer Qualität hergestellt werden. Jedoch ist deren Einsatz aufgrund ihrer Abmessungen beschränkt. Es scheint lohnenswert, den im Rahmen der Dissertation entwickelten Sägeprototypen so weit zu vergrößern, dass auch Quaderballen geschnitten werden können, um den Einsatzbereich dieser Ballen zu erweitern.

Das elastomechanische Verhalten von Strohballen und Strohballenwänden wurde in über 200 Tests untersucht. Es wurde festgestellt, dass sich hochkant liegende Ballen für die Verwendung in lasttragenden, seitlich begrenzten und gegen Knicken stabilisierten Strohballenkonstruktionen besser eignen als flach liegende Strohballen. Es wird empfohlen, Strohballenwände mit einer Maximalspannung von 20 kN/m² zu belasten. Soll eine Setzung der Konstruktion in der Nutzungsphase verhindert werden, müssen Wände aus hochkant liegenden Ballen unter den genannten Bedingungen um 8%, solche aus flach liegenden Ballen mit 14% im Bezug auf die Anfangshöhe vorkomprimiert werden. Wird ein Kriechen der Konstruktion in Kauf genommen, muss mit ultimativen Setzungen von 1,8% (hochkant liegende Ballen) bzw. 3,1% (flach liegende Ballen) unter den genannten Bedingungen gerechnet werden.

Kleinere lasttragende Gebäude mit Gründach können sogar mit hochkant liegenden HD-Ballen errichtet werden. Kommen Quaderballen und leichte Dächer zum Einsatz, sind auch zwei- und dreigeschossige lasttragende Strohballengebäude theoretisch möglich. Eine vielversprechende Möglichkeit, weit gespannte Tragwerke mit Strohballen zu realisieren, könnten in Zukunft Tonnengewölbe sein.

Als Rechenwerte für den Primärenergieinhalt von Quaderballen können 50 kWh/Mg, für HD-Ballen 63 kWh/Mg angesetzt werden. Besonders günstige Primärenergieinhalte weisen lasttragende Tonnengewölbe, ballenbündige fugenorientierte Skelette und Doppelskelette auf. Die Primärenergieinhalte von Strohballenkonstruktionen liegen bei gleichen U-Werten deutlich unter denen konventioneller Konstruktionen.

Es konnte gezeigt werden, dass mit der Verwendung von Strohballen der Passivhausstandard zwar nicht impliziert ist, jedoch bei der Verwendung von hochkant liegenden bzw. stehenden Q-Ballen gute Möglichkeiten bestehen, diesen Standard zu erreichen.

Hinsichtlich des Arbeitsaufwandes zur Erstellung schneiden nicht lasttragende, verschalte Konstruktionen, bei denen stehende Ballen zum Einsatz kommen, am besten ab.

Für den nicht lasttragenden Strohballenbau wird der Einsatz stehender Strohballen empfohlen. Für lasttragende Konstruktionen sollten unter der Prämisse des Einsatzes seitlicher Einspannungen und horizontaler Stabilisierungen hochkant liegende Strohballen verwendet werden.

Aufgrund der Ergebnisse der vorliegenden Dissertation kommt der Verfasser zu dem Schluss, dass nicht lasttragende Strohballenbausysteme lasttragenden unter den in Deutschland gegebenen Bedingungen ökonomisch wie ökologisch überlegen sind. Da eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für lasttragende Gebäude in Deutschland nach der Einschätzung des Verfassers innerhalb der nächsten Jahre auch mit erheblichem Forschungsaufwand nicht zu erwarten ist, liegt es nahe, zunächst auf eine Erweiterung der bauaufsichtlichen Zulassung für nicht lasttragende Strohballenkonstruktionen hinzuarbeiten um die Verbreitung des Strohballenbaus zu fördern.

Abstract

Straw Bale Building is said to be a promising way of building both under ecological and economical aspects. But its spread in Germany is slowed down by a lack of knowledge. This PhD thesis wants to make a contribution in speeding up the spreading of Straw Bale Building by increasing the knowledge about it.

Within the framework of this thesis the characteristics of the hydroscopic sorption of different sorts of straw were tested. Based on those tests equations to specify the equilibrium moisture content according to the BET-theory were set.

The use of straw bales containing highly damaged straw fibers should be avoided respectively only used in non load bearing constructions. Combine harvesters with an axial threshing machine should not be used in threshing straw for straw bale buildings because of its negative influence on the straw fibers. Field tests have shown that ordinary two string balers can produce straw bales of sufficient quality for straw bale building by optimizing the baling conditions. However, improvements are desirable. Jumbo Bales can be produced in much higher quality. But the use of these bales is limited by its size. It seems to be worth to improve the straw bale saw developed in this thesis to enable it to cut Jumbo Bales, too, in order to increase the range of use of Jumbo Bales.

The elastomechanical performance of straw bales and straw bale walls were examined in more than 200 tests. The author found out that bales on edge are more suitable in load bearing constructions than bales on edge under the certain condition that lateral margins and horizontal inlays are used to stabilize the constructions against horizontal buckling. It is recommended to load straw bale walls to a maximum stress of 20 kN/m². If you want to avoid creeping within the lifetime of the straw bale building, walls made of bales on edge must be precompressed down to 92%, walls made of bales lying flat down to 86% of the original height under the described conditions. Should creeping be allowed, ultimate creeping of 1.8% (bales on edge) resp. 3.1% (bales on flat) must be calculated under the conditions mentioned.

Little load bearing buildings with green roofs can even be constructed by two string bales on edge. If Jumbo Bales and light roofs are used, two and even three story houses are theoretically possible. Load bearing vaults made of straw bales could be a promising option to realize wide spanning structures in the future.

The primary energy content was calculated by 50 kWh/Mg for Jumbo Bales and by 63 kWh/Mg for two string bales. A load bearing vault and two special timber frame constructions have the most favorable values for the primary energy content. The primary energy contents of all the analyzed straw bale construction systems are very much lower than the primary energy content of conventional constructions.

The Passive House Standard can be achieved by using Jumbo Bales on edge or on top.

Looking at the amount of work involved to build straw bale structures, non load bearing constructions filled with bales on top with outside wooden cladding could be considered as best.

Bales standing on top can be recommended for use in non load bearing constructions. Supposing that lateral margins and horizontally inlays are used, bales on edge can be recommended for the use in load bearing structures.

According to the results of this thesis the author comes to the conclusion, that under the current conditions in Germany non load bearing constructions are superior to load bearing constructions both under ecological and economical aspects. The author believes that an official approval for load bearing constructions will not be achieved within the next few years even if research is highly increased. He suggests to go for the enhancement of official approval of non load bearing constructions first to support the spreading of straw bale building.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung, Problemstellung und Zielsetzung

Nicht erst seit der Veröffentlichung des Berichtes des Weltklimarates, des G8-Gipfels in Heiligendamm und der Klimakonferenz auf Bali ist der Klimawandel in aller Munde. Die anthropogene Induktion des Treibhauseffekts ist, zumindest in Europa und in zunehmendem Maße auch in den Vereinigten Staaten, gesellschaftlich wie wissenschaftlich ebenso anerkannt wie die möglichen negativen Folgen auf Mensch und Umwelt. Die Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland strebt daher für das Jahr 2020 eine Reduktion der Treibhausgasemissionen von 40% der Basis von 1990 an. Verursacher der Treibhausgasemissionen in Deutschland sind Industrie, Verkehr und der Bausektor zu etwa je einem Drittel.
Im Baubereich wird Energie einerseits zum Erstellen, andererseits zum Betrieb von Gebäuden benötigt. Um die ehrgeizigen Reduktionsziele zu erreichen ist es unabdingbar, dass auch im Baubereich drastisch Energie eingespart wird. Die Bundesregierung hat dies erkannt und unterstützt den Neubau energiesparender Gebäude z.B. mit dem Programm „Ökologisch Bauen“ und die energetische Sanierung mit dem „CO_2-Sanierungsprogramm“ der KfW-Bank.

Als ein Baustein zur Reduktion des Energieverbrauches im Bau- und Gebäudebereich kann der Strohballenbau genannt werden. Stroh ist als landwirtschaftliches Produkt ein nachwachsender Rohstoff, der bei der Getreideproduktion anfällt und in großen Mengen verfügbar ist. Dieses Stroh kann zu quaderförmigen Ballen gepresst und unter bestimmten Bedingungen als Baumaterial eingesetzt werden. Untersuchungsbedarf besteht bei der Optimierung der Herstellungsweise von Baustrohballen mit marktüblichen Strohballenpressen und bei der Bewertung unterschiedlicher Strohballenkonstruktionen. Es werden grundsätzlich zwei Bauweisen unterschieden. Bei der lasttragenden Bauweise werden Strohballen als statisch wirksame Elemente eingesetzt, die Dach- und Deckenlasten aufnehmen. In der nicht lasttragenden Bauweise übernehmen additive Elemente, z.B. Holzständer, die statischen Funktionen. Der Strohballen dient hier dem Raumabschluss und der Wärmedämmung.

Da Strohballen als landwirtschaftliches Nebenprodukt mit geringem Energieaufwand hergestellt werden können, wird davon ausgegangen, dass auch Strohballenkonstruktionen im Vergleich zu konventionellen Konstruktionen mit einem geringen Energieaufwand errichtet werden können.
Die regionale Verfügbarkeit von Stroh und die damit implizierte Stärkung regionaler Wertschöpfungsketten, die toxische Unbedenklichkeit und biologische Abbaubarkeit gelten als weitere Vorteile des Strohballenbaus. Aufgrund des geringen Preises von Strohballen wird angenommen, dass sich Strohballenbauten preisgünstiger erstellen lassen als vergleichbare konventionelle Gebäude.
Da die Strohballen in lasttragenden Konstruktionen auch die statische Funktion übernehmen und additive Tragelemente entfallen, wird lasttragenden Gebäuden eine einfachere, schnellere, preisgünstigere und mit einem geringeren Energieaufwand verbundene Herstellung zugesprochen als nicht lasttragenden Strohballengebäuden (vgl. Minke /Mahlke 2004: 19, Minke in Snel 2004: 37:00 ff.).

Durch die leichte Handhabbarkeit der Ballen gilt der Strohballenbau als geeignet für den Selbstbau und das handwerkliche Bauen.

In zahlreichen Tests wurde die geringe Wärmeleitfähigkeit von Stroh nachgewiesen. Aufgrund dieser scheint ein Erreichen des Passivhausstandards bei konsequenter Vermeidung von Wärmebrücken bereits bei der Verwendung kleiner Strohballen (HD-Ballen) möglich. Das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) hat im Jahr 2006 erstmalig eine Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (AbZ) für die Verwendung von Baustrohballen in nicht lasttragenden Konstruktionen unter bestimmten, eng begrenzten Bedingungen erteilt. Zur vollständigen Anerkennung der ökologisch und ökonomisch sinnvollen Strohbauweise besteht jedoch noch erheblicher Klärungs- und Forschungsbedarf. Den genannten Vorteilen stehen massive Bedenken der Zulassungsbehörden insbesondere im Bereich des Feuchteverhaltens der elastomechanischen Eigenschaften von Strohballen und Strohballenkonstruktionen gegenüber.

Hier setzt die vorliegende Dissertation mit dem Ziel an, durch Detailforschung und durch das Verfügbarmachen von vorhandenem Wissen aus unterschiedlichen Disziplinen einen Beitrag zur anstrebenswerten Erweiterung der bauaufsichtlichen Zulassung zu leisten. Damit soll zur Verbreitung des Strohballenbaus und letztlich zum Klimaschutz beigetragen werden.

Einführend werden die Grundlagen zu Getreide und Getreidestroh, zur Wärmeleit- und Speicherfähigkeit, zur Gefährdung von Stroh durch Schimmelpilze und zur Herstellung von Strohballen dargestellt. Untersuchungen zu dem Primärenergieinhalt von Strohballen, zu den hygroskopischen Sorptionseigenschaften von Stroh und zur Optimierung der Strohballenherstellung hinsichtlich ihrer Verwendung im Strohballenbau mit marktüblichen Maschinen, sollen die qualitative Eignung von Stroh und Strohballen als Baustoff für hochwertiges, energiebewusstes und ökologisches Bauen belegen (Teil I)

Da die lasttragende Bauweise im Vergleich zur nicht lasttragenden Bauweise als ökonomisch wie ökologisch überlegen gilt, wird ein besonderer Schwerpunkt auf das elastomechanische Verhalten von Strohballen und Wänden aus Strohballen sowie auf die Untersuchung statischer Möglichkeiten und Grenzen lasttragender Strohballenkonstruktionen gelegt (Teil II).

Teil III ist dem Strohballenbau gewidmet. Nach der Beschreibung verschiedener Strohballenkonstruktionssysteme werden verschiedene Konstruktionssysteme untersucht und bewertet, die statischen Grenzen und Möglichkeiten lasttragender Strohballenkonstruktionen werden aufgezeigt.
Den Abschluss bilden Gestaltungsbeispiele und deren Diskussion.

Teil I – Stroh als Baustoff

1 Über Getreide und Getreidestroh

1.1 *Allgemeines*

Getreide (vom althochdeutschen „gitregidi“: Ertrag, Besitz) ist laut Brockhaus (1994: 446ff.) die Sammelbezeichnung für landwirtschaftlich kultivierte, einjährige Pflanzenarten aus der Familie der Süßgräser mit einsamigen Früchten (Karyopsen). Die Samen (Körner) der Pflanze sind Hauptnahrungsquelle für Mensch (Nahrungsgetreide) und Tier (Futtergetreide). Stroh stammt vom mittelhochdeutschen „stro“ (streuen, ausbreiten) ab. Als Stroh werden ausgereifte, getrocknete Getreidehalme ohne Körner bezeichnet.

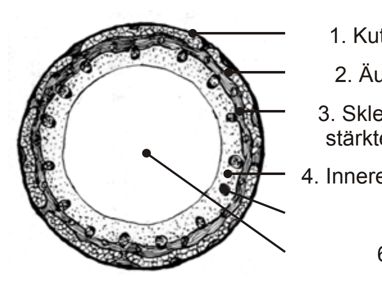
Die Getreidekultivierung ist eng mit der Entwicklungsgeschichte des Menschen verbunden. Archäologische Funde sprechen für einen Getreideanbau ab dem 9. Jahrtausend vor Christus in Vorderasien. Weizen und Gerste kamen im fünften vorchristlichen Jahrtausend nach Mitteleuropa, Hafer und Roggen wurden erst später aus Wildkräutern zu Kulturpflanzen herangezüchtet.

Es ist davon auszugehen, dass die Menschen seit der Nutzung des Getreidekorns das beim Anbau abfallende Stroh zu verschiedensten Zwecken, so auch als Hilfsstoff zur Erstellung von Unterkünften nutzten. Bedeutung im Bereich des Bauens erlangte Stroh vor allem als Zuschlagstoff in Lehm und als Material zum Decken von Dächern.
Die Industrialisierung des Bauens machte preiswerte andere Baustoffe verfügbar, der Lehmbau wurde zurückgedrängt und mit ihm verlor auch das Stroh als Baustoff an Bedeutung (Minke 2001:13ff.). Schrader (1998: 53) führt im Bezug auf den Rückgang der Verwendung von Stroh als Dacheindeckung zusätzlich an: 1. Die Verschärfung bzw. Einführung von Brandschutzbestimmungen in Städten ab dem 13. Jahrhundert. 2. Das Aufkommen von dampfgetriebenen Dreschmaschinen ab dem 18. Jahrhundert, die das Stroh in seiner Struktur soweit schädigten, dass es sich nicht mehr zur Dacheindeckung eignete.

Traditionell werden sieben Getreidearten unterschieden. Weizen, Roggen, Gerste und Hafer werden vor allem in gemäßigten Klimazonen angebaut. Mais, Reis und Hirse stammen ursprünglich aus den heißen Klimazonen. Dinkel ist eine Weizensorte. Es ist denkbar, auch andere Faserpflanzen wie z.B. Hanf, Miscanthus oder Bohnenstroh zu Ballen zu pressen und als Baumaterial zu verwenden. Siehe hierzu 1.3.3.

1.2 *Anatomischer und morphologischer Aufbau von Getreidepflanzen*

Getreide gehört zur Familie der Süßgräser (Poaceae). Der Aufbau ist innerhalb der Familie einheitlich und wird durch die Gliederung des Halmes in Nodien (Knoten), die den Halm durch eine horizontale Scheibe teilen, und röhrenförmige Internodien, die die Bereiche zwischen den Nodien bilden, gekennzeichnet. Zum oberen Halmende hin werden die Internodien länger, Halmdurchmesser und Wandstärken variieren sowohl zwischen den als auch innerhalb der Internodien. (vgl. Strasburger 1998, O´Dogherty et al. 1998, beide zitiert in: Struwe 2007: 14ff., Aufhammer/Fischbeck 1973: 20ff.)



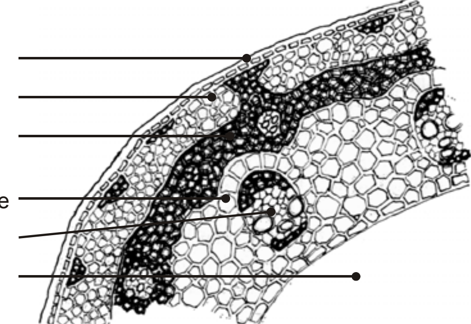


Abbildung 1.1: Querschnitt durch einen Roggenhalm (verändert nach Aufhammer/Fischbeck 1973: 23)

Abbildung 1.1 stellt den Querschnitt eines Getreidehalmes schematisch dar. Dabei werden von außen nach innen die folgenden Schichten unterschieden:

1. **Kutinisierte Epidermis:** Mit Epidermis(griech. „epi“: über, darauf, „derma“: Haut) wird im Allgemeinen die äußerste Haut/Schutzschicht von Organismen bezeichnet. Kutin ist eine polyesterartige Substanz, die auf der Oberfläche spezieller pflanzlicher Zellen zu finden ist. Eine Kutinschicht bewirkt eine nahezu vollständige Hydrophobierung der Zelle und verbessert ihre mechanische Beanspruchbarkeit. Die vergleichsweise harte kutinisierte Epidermis schützt einerseits den Halm vor Witterungseinflüssen, trägt gleichzeitig zu seiner Festigkeit bei und verhindert andererseits das Austrocknen der Pflanze. (Strasburger 2002: 124ff.).

2. **Äußere Parenchymschicht:** Von griech. „enchyma“: das Eingeschlossene, Füllung. Das Parenchymgewebe ist ein relativ weicher Bestandteil der Pflanze, welcher die Räume zwischen anderen Gewebearten füllt und Nährstoffe und Wasser speichert. (Strasburger 2002: 122f).

3. **Sklerenchymring mit Sklerenchymleisten:** Sklerenchymgewebe (griech. „sklerós“: hart, spröde) besteht aus teilweise verholzten, abgestorbenen Zellen mit dicken, ligninverstärkten sekundären Zellwänden. Diese Zellen sind vergleichsweise hart und bilden einen wichtigen Bestandteil des Traggerüstes der Pflanze.
   Bei der Betrachtung eines Querschnittes durch den Strohhalm erinnert die Anordnung der Skerenchymleisten an ein Zahnrad mit überdimensionaler Bohrung, wobei die „Zähne“ statische Verstärkungen dieses Ringes darstellen. Sklerenchymfasern kommen in zwei Arten vor: An Orten mit Zugbelastung werden unverholzte, elastischere Fasern ausgebildet, bei zusätzlicher Druckbelastung lignifizierte Hartfasern. Sklerenchymgewebe ist bis zu 100-mal steifer als Parenchymgewebe. (Strasburger 2002: 132-134).

4. **Inneres Parenchymgewebe** mit eingebetteten Leitbündeln (siehe 5.).

5. **Eingebettete Leitbündel:** Primäre Aufgabe der Leitbündel ist der Nährstoff- und Wassertransport innerhalb der Pflanze. Besonders zur Mitte und zur Außenseite der Pflanze hin werden die Leitbündel von Sklerenchymfasern flankiert. (vgl. Strasburger 2002: 133ff., Aufhammer/Fischbeck 1973: 23).

6. **Markhöhle:** Die Markhöhle ist der durch die Nodien unterteilte, gewebefreie Raum in der Halmmitte.

1.3 Kurzbeschreibung der Getreidearten und untersuchten Pflanzen

In diesem Abschnitt werden die Getreidearten und untersuchten Pflanzen kurz dargestellt. Eine ausführlichere Beschreibung enthält Anhang I.1 *Beschreibung der Getreidearten*.

1.3.1 Getreidearten

Gerste
Die Gerste (lat. Hordeum) gilt neben dem Weizen als das älteste Getreide. Sie ist sowohl in heißen Klimazonen (z.B. Arabien) als auch in gemäßigten oder kühlen Klimazonen (in Norwegen bis zum 70. Breitengrad) und sogar in hochalpinen Lagen über 4600 m über NN verbreitet und ist deutlich anspruchsloser als Weizen. Gerste wurde im Altertum in den Hochkulturen Mittel- und Westasiens, Ägyptens und Europas angebaut und erlangte in Griechenland eine hohe kultische Bedeutung (vgl. Brockhaus 1989: 378f, Renzenbrink 1993: 98ff.).

Hafer
Das Wort Hafer (lat. Avena) kommt ursprünglich vom altsächsischen „hafero“ und bedeutet „Futter für den Ziegenbock“. Die ursprünglichen Verbreitungsgebiete des Wildhafers sind der Mittelmeerraum, Zentralasien und Nordafrika. In Deutschland ist der Windhafer (Avena fatua) heimisch, von dem wahrscheinlich der heutige Saathafer (Avena sativa) abstammt. Der Hafer hat in den frühen Hochkulturen keine Bedeutung und wurde vermutlich in Norddeutschland in der Bronzezeit erstmals kultiviert (vgl. Brockhaus 1989a: 346f, Renzenbrink 1993: 144ff.).

Reis
Reis (lat. Oryza) wurde ab dem vierten Jahrtausend vor Christus zunächst im tropischen Asien (Thailand, China) kultiviert. Reis hat heute größte Bedeutung für die Ernährung, vor allem in Asien. Hauptanbaugebiete sind heute die tropischen und subtropischen Gebiete Asiens und Amerikas. Es existiert eine ausgesprochen hohe Sortendiversität. Allen Sorten ist ein sehr hoher Wasserbedarf gemein vgl. Brockhaus 1992: 244f, Renzenbrink 1993: 78ff.).

Roggen
Hauptanbaugebiete des Roggens (lat. Secale cereale) sind Nordeuropa und Sibirien.
Der Roggen wurde vermutlich in den 15.-11. vorchristlichen Jahrhunderten erstmalig in Nordeuropa kultiviert, wo er sich besser an das sich verschlechternde Klima anpassen konnte als Weizen und Gerste. Er diente den Germanen als wichtiges Brotgetreide. Der Anbau wurde von den Slawen und Kelten übernommen. Roggen ist das anspruchsloseste Getreide. Er stellt an Böden und Klima deutlich geringere Anforderungen als Weizen oder Gerste (vgl. Brockhaus 1992: 477f, Renzenbrink 1993: 130ff.).

Weizen und Dinkel
Weizen (lat. Triticum; vom althochdeutschen „Weizi“: „der Weiße“ - nach der Farbe des Mehls) ist neben der Gerste das älteste Getreide. Wie diese wurde er in den Hochkulturen des Zweistromlandes in der Jungsteinzeit in Züchtung genommen und erlangte besonders bei den Persern kultische Bedeutung. Hauptverbreitungsgebiete sind Eurasien und Nordamerika. Der Weizen lässt sich in die Arten Einkorn, Emmer und Dinkel aufteilen. Der heutige, in Europa kultivierte Saatweizen (Triticum aestivum) stammt vom Dinkel ab.
Triticale, ein modernes Futtergetreide ist eine Kreuzung aus Weizen (Triticum) und Roggen (Secale) (vgl. Brockhaus 1994: 731f, Renzenbrink 1993: 63ff.).
Dinkel (lat. Triticum spelta) wird als Vorläufer des heutigen Saatweizens oft als Urweizen bezeichnet. Der winterharte Dinkel ist bezüglich des Standortes und der klimatischen Verhältnisse weniger anspruchsvoll als Weizen, liefert jedoch geringere Erträge. Als Anbaugebiete werden Eifel, Odenwald, Schwarzwald, Allgäu und die Nordschweiz genannt (vgl. Brockhaus 1988: 515f, Renzenbrink 1993: 71ff.).

1.3.2 Tabellarische Übersicht der Eigenschaften, Erscheinungsformen und Zusammensetzungen der beschriebenen Getreidearten

Tabelle 1.1 gibt eine Übersicht über die Eigenschafen, Zusammensetzungen und Erscheinungsformen der beschriebenen Getreidearten

Tabelle 1.1: Übersicht der Eigenschaften, Erscheinungsformen und Zusammensetzungen der beschriebenen Getreidearten

	Gerste		Hafer	Reis	Roggen	Weizen		
	Winter-G.	**Sommer-G.**				**Winter-W.**	**Sommer-W.**	**Dinkel**
Aussaat	2. Sept. Hälfte	Anfang März	Anfang März		September-Dezember	Sept.-Dez. (nach Rogen)	Anfang März	Sept.-Dez. (nach Roggen)
Ernte	Anfang Juli	Mitte August	Ende August		August	Juli	August (nach Roggen)	Juli
Wuchshöhe (cm)	80-100		60-150	50-160	65-200	70-90		
Begrannung	Lang		ohne		mittellang		Sehr kurz	
Blattröhrchen								
Blatthäutchen								
Ährenform								
TS (%)	87,8		88,4	89,0	90,0	90,3		84,6
OS (%)	82,3		82,8	73,5	86,1	84,6		78,8
RP (%)	3,3		2,7	4,5	2,9	2,6		2,7
Rohfett (%)	1,4		1,6	1,5	1,3	1,4		1,3
Rohfaser (%)	38,2		41,1	34,6	41,6	33,6		41,3
Ligningeh. (%)	14,7		13,2	14,2	13,5	14,4		
Asche	5,3		5,6	15,4	3,9	15,0		5,8
GS (%)	80,6		81,4		83,0		80,4	
Anteil am Gesamtstrohaufkommen (%)[1]	32		4	k.A.	14	Weizen: 41; Tritikale: 8		k.A.

Mit: TS: Trockensubstanz (%), OS: Organsubstanz (%), RP: Rohprotein (%), GS: Gerüstsubstanzen (%). Daten und Grafiken vgl. Brockhaus (1988, 1989, 1992, 1994), Renzenbrink (1993), Aufhammer/Fischbeck (1973), Becker/Nehring (1965), Jeroch et al. (1993) [1]: Vgl. Leible et al. 2003: 26

1.3.3 Weitere untersuchte Pflanzen

Neben Dinkel-, Gerste-, Roggen- und Weizenstroh wurden die elastomechanischen und hygroskopischen Eigenschaften von Ballen folgender Pflanzen untersucht:

Ackerbohnen gehören zur Familie der Leguminosen (Fabaceae). Der Stängel ist unverzweigt, unregelmäßig polygonal, kräftig, hohl und zum Erntezeitpunkt stark verholzt. Die Pflanzen erreichen je nach Sorte und Anbaubedingungen Höhen von bis zu 2 m (vgl. Bond et. al. 1985, zitiert in Struwe 2007:16)

Hanf wurde bereits vor 10.000 Jahren in China kultiviert und gilt als eine der ältesten Nutzpflanzen. Nutzhanf (Cannabis sativa) wird in europäischen Breiten je nach Sorte 0,5 bis 4 m hoch, ist schnell wachsend und wurzelt bis zu 1,4 m, weshalb er gern zum Auflockern verhärteter Böden eingesetzt wurde. Hanf ist anspruchslos und leicht zu kultivieren. Durch sein extrem schnelles Wachstum, das das Aufkommen von Unkraut verhindert, müssen keine Herbizide eingesetzt werden.
Hanf gewinnt als Rohstoff- und Energielieferant zunehmend an Bedeutung. Die sehr langen und reißfesten Fasern können vielfältig eingesetzt werden. Der psychoaktive Wirkstoff THC (Tetrahydrocannabinol) kommt in größeren Mengen nur in unbestäubten, weiblichen Blüten vor. Der Flächenertrag von Hanf wird mit 15 t TM/ha (für Mitteleuropa) angegeben. (www.wikipedia.de, Zugriff am 26.06.2007)

Switchgras ist eine ursprünglich in Nordamerika zwischen dem 55. Breitengrad und Mexiko heimische, schnellwachsende, mehrjährige C4-Pflanze. Die Pflanze gedeiht auch auf schlechten Böden, braucht wenig Pflege und ist daher bei einem hohen Biomasseertrag kostengünstig zu kultivieren. Seit den frühen 1990er Jahren wird Switchgras in den USA als Energiepflanze vornehmlich zur Herstellung von Ethanol, seit einigen Jahren auch in Europa, angebaut. (www.switchgrass.nl, Zugriff am 26.06.2006)
Switchgras gehört wie Getreide zur Familie der Süßgräser (Poaceae) und ist im Aufbau diesem sehr ähnlich (vgl. Struwe 2007: 16).

Miscanthus (auch Elefanten- oder Chinagras) ist wie Switchgras eine schnellwachsende, mehrjährige C4-Pflanze. Die Staude erreicht Höhen bis zu 4 m und Dicken von bis zu 2 cm an der Halmbasis. Miscanthus bringt auf guten Standorten Erträge von bis zu 25 t TM/a. Vermehrung über Rhizomaustrieb, Nutzungsdauer bis zu 20 Jahren. In Deutschland wurde Miscanthus 2004 auf ca. 325 ha kultiviert. (www.miscanthus.de, Zugriff am 26.06.2007)

1.4 Mechanische Eigenschaften unbeschädigter Strohhalme

Wird ein Bauteil auf Biegung beansprucht, bilden sich Zug- und Druckzonen aus. Dabei nimmt die Belastung zur Mitte des Bauteilquerschnittes hin ab, das Material wird ungleichmäßig belastet. Daraus ergeben sich Möglichkeiten der Optimierung des Materialeinsatzes durch Anordnung der Materialmenge entsprechend dem Kräfteverlauf (z.B. Doppel-T- Stahlträger) oder durch den Einsatz unterschiedlicher Materialien (Abbildung 1.2).
Beton z.B. kann nur geringe Zugspannungen aufnehmen. Daher wird im Stahlbeton diese Funktion von Armierungsstählen übernommen.

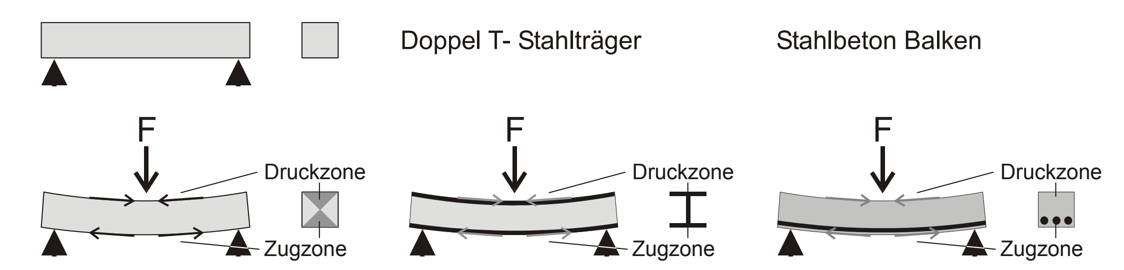


Abbildung 1.2: Zug- und Druckzonen bei Biegebalken, Optimierung durch Materialkumulierungen bzw. Verbundmaterialien

Statisch gesehen ist ein Strohhalm eine eingespannte Stütze mit freiem Ende (siehe Bild 1 in Abbildung 1.3). Durch das Eigengewicht des Halms und die Masse der Ähre wird der Halm vertikal belastet. Die Höhe des Halmes kann in der Natur das 500-fache des Halmdurchmessers an der Basis betragen. Ein Halm ist extrem schlank. Schlanke Bauteile neigen zum Ausknicken, d.h. sie biegen sich unter Belastung (2 in Abbildung 1.3) und brechen im Extremfall. Auch hier kann die Belastbarkeit z.B. durch Verlagerung des Materials weg vom

Zentrum an die Peripherie optimiert werden. Ein Rohr entsteht (3 in Abbildung 1.3).
Durch Wind wird ein Halm auch horizontal belastet. Dabei ist die Windrichtung nicht vorhersehbar. Am Beispiel des Biegebalkens wurde gezeigt, wie ein Querschnitt auf eine in eine bestimmte Richtung wirkende Kraft hin optimiert werden kann. Aus dieser Optimierung resultiert eine Schwächung des Bauteils gegenüber Kräften, die aus anderen Richtungen wirken. Aus einer Optimierung eines Bauteils für jegliche horizontale Belastung resultiert wiederum das Rohr (5-7 in Abbildung 1.3).

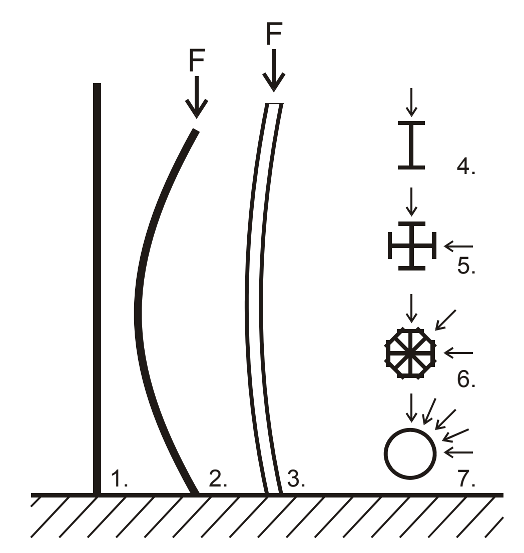


Abbildung 1.3: Statisches System eines Strohhalms

Die Statik des Strohhalms ist sowohl durch die Verlagerung des Materials weg vom Zentrum an die Peripherie (Bildung eines Rohres) als auch durch die Verwendung unterschiedlich belastbarer Materialien innerhalb des Rohrmantels optimiert.
Ein Strohhalm kann vereinfacht mit einer stahlverstärkten Betonstütze verglichen werden. Dabei stellen die „harten“ Bestandteile Epidermis, Sklerenchymring und Sklerenchymleisten sowie die Sklerenchymverstärkung der Leitbündel die Stahlarmierung dar, die Parenchymschichten die Betonfüllung
(vgl. Abbildung 1.4).
Die auftretenden Kräfte werden in erster Linie durch diese Verstärkungen aufgenommen, die Füllung verbindet diese Verstärkungselemente und wirkt so als zusätzliche Aussteifung. (vgl. z.B. Ahlgrimm 1977, zitiert in Struwe 2007: 19)

Während der Strohhalm im Wachstumsstadium eine hohe Flexibilität aufweißt, lässt diese infolge der Lignin Inkrustierung und der Wasserabnahme in den Zellen im Verlauf des Reifens zugunsten einer höheren Steifigkeit nach. Dies hat weitreichende Auswirkungen auf das Verhalten des Halms unter Belastung:

Der grüne Halm verformt sich unter Last stark, aber elastisch, d.h. nach dem Entfernen der Last kehrt er in seine Ausgangsposition zurück. Im Gegensatz dazu verformt sich der trockene, gelbe Halm bei gleicher Last zunächst weniger stark, er ist also steifer, wird aber gleichzeitig spröder und neigt bei größer werdender Belastung zum Bruch. Es tritt eine plastische, also irreversible Verformung ein. Dieses Sprödbruchverhalten nimmt mit abnehmendem Wassergehalt und zunehmendem Reifegrad zu. (vgl. Brumistrova et. al. 1963, zitiert in Struwe 2007)

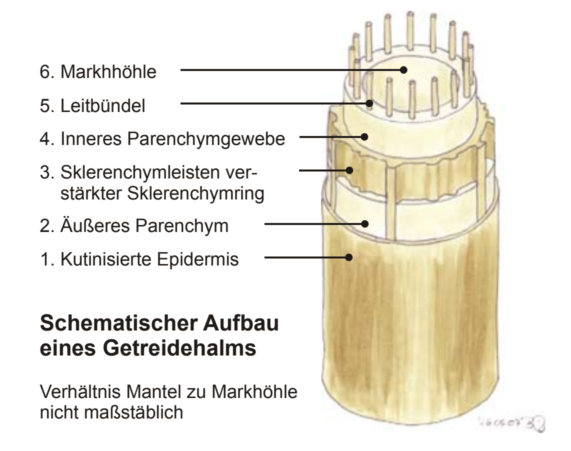


Abbildung 1.4: Schematischer Aufbau eines Getreidehalms

Wie alle rohrförmigen Bauteile verhalten sich Strohhalme in Abhängigkeit von der Belastungsrichtung anisotrop: die Reaktion des Bauteils auf Kräfte aus unterschiedlichen Richtungen ist nicht analog. Kräfte in der Richtung des Rohres können besser abgetragen werden als Kräfte senkrecht zur Rohrlängsachse.
Das Verhalten des Halms bei Belastung in Richtung der Längsachse wurde oben beschrieben (z.B. Abbildung 1.3). Bei Belastung senkrecht zur Längsachse wird sich das Rohr zunächst zu einem Oval verformen. Bei frischen, elastischen Halmen und geringen Kräften nimmt es nach dem Entfernen der Last wieder seine Ausgangsgeometrie an. Mit zunehmendem Reifegrad und zunehmender Belastung wird der Halm brechen und sich plastisch verformen (Abbildung 1.5).

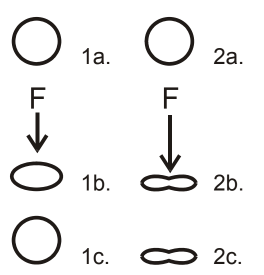


Abbildung 1.5: Verformung eines Rohres: a) vor dem Aufbringen der Last, b) unter Last, c) nach dem Entfernen der Last. 1 elastische, 2 plastische Verformung

1.5 Eignung der unterschiedlichen Stroharten für das Bauen mit Strohballen

Hansen/Warmuth (2004: 7) vermuten einen Zusammenhang der „Festigkeit von Bauballen“ und der „Holzigkeit“ des Strohs. Sie geben entsprechend dieses Kriteriums folgende Reihenfolge der Eignung für das Bauen mit Strohballen an:

1. Winterweizen,
2. Dinkel,
3. Roggen,
4. Wintergerste,
5. Sommerweizen,
6. Hafer,
7. Sommergerste.

Auffällig ist, dass den Wintergetreiden bessere Eigenschaften im Bezug auf die Festigkeit zugesprochen werden als den Sommergetreiden.
Der Begriff der „Holzigkeit“ wird bei Hansen/Warmuth nicht weiter erläutert.
Unter einer Verholzung wird nach Strasburger (2002:95) im Allgemeinen eine Lignifizierung verstanden: In Zellwände von Pflanzen wird Lignin eingelagert. Die Zellwände werden dadurch dick und steif, die Zellen sterben ab.

Bezugnehmend auf Tabelle 1.1 ergibt sich für den Ligninanteil der verschiedenen Stroharten die folgende absteigende Reihenfolge:

1. Wintergerste
2. Winterweizen
3. Reis
4. Winterroggen
5. Hafer

Die Aufstellungen nach „Holzigkeit“ und Ligningehalt weisen somit deutliche Unterschiede auf.

Die Untersuchungen zum elastomechanischen Verhalten von Strohballen von Ashour (2003) und Struwe (2007) brachten keine signifikanten Unterschiede im Verhalten von Strohballen unter Druckbeanspruchung, die auf die Strohsorte zurückgeführt werden können (vgl. Teil II, *Elastomechanischen Verhalten von Strohballen und Strohballenwänden*). Die Unterschiede der Elastizitätsmodule unterschiedlicher Strohsorten werden im Teil II *Elastomechanisches Verhalten* untersucht und diskutiert.

2 Experiment Sorptionsisothermen

2.1 Motivation

Anhand der Sorptionsisotherme eines Stoffes können Rückschlüsse auf dessen Schimmelanfälligkeit gezogen werden. Auch kann mit Hilfe von Sorptionsisothermen der Feuchtegehalt eines Stoffes und damit dessen Trockenmasse errechnet werden. Sowohl die Berechnung der Trockenmasse als auch Aussagen zur Schimmelanfälligkeit von Stroh waren im Rahmen dieser Arbeit notwendig bzw. wünschenswert. In der Literatur wurden nur fragmentarische Sorptionsisothermen weniger Stroharten gefunden (vgl. Ashour 2003: 147ff, Minke/Mahlke 2004: 32, King 2006: 137). Daher wurden die Sorptionsisothermen von Dinkel-, Gerste-, Roggen-, Weizen- und Bohnenstroh sowie von Hanffasern, Switchgras und Miscanthus in dieser Arbeit ermittelt.

2.2 Grundlagen zum hygroskopischen Verhalten von Baustoffen

Unter hygroskopischem Verhalten werden die Eigenschaften eines Stoffes, Wasser aus der Luftfeuchtigkeit aufzunehmen und wieder abzugeben, verstanden. Wird ein Stoff über längere Zeit bei konstanter relativer Luftfeuchte[1] und Temperatur gelagert, stellt sich ein stoffspezifischer Wassergehalt im Körper ein. Dieser spezifische Wassergehalt wird **Gleichge-**

[1] Die relative Luftfeuchte φ stellt das Verhältnis des absoluten Feuchtegehaltes der Luft zum maximalen Feuchtegehalt der Luft, der Sättigungsfeuchte, dar. Die relative Luftfeuchte wird in % oder dimensionslos angegeben. In dieser Arbeit wird die dimensionslose Darstellung verwendet, da die BET-Theorie die dimensionslose Eingabe der Luftfeuchte verlangt. Zudem ist die relative Luftfeuchte in dieser Darstellung gleich der Wasseraktivität aW, einem in der Biologie verwendetem Maß für das freie Wasser, welches Mikroorganismen wie Schimmelpilzen zur Verfügung steht, vgl. Sedelbauer/Krus 2002a: 2). Bei einer relativen Luftfeuchte von 1 (bzw. 100%) ist die Luft wassergesättigt. Es kann keine weitere Feuchtigkeit mehr aufgenommen werden. Dabei kann Luft umso mehr Feuchte aufnehmen, je wärmer sie ist. Wird Luft abgekühlt, steigt folglich die relative Luftfeuchte bis maximal 1. Kühlt die Luft weiter ab, kommt es zu Kondensation. (Vgl. Willems/Schild/Dinter 2006: 5.8f).

wichtsfeuchte genannt. Der Vorgang der Wasseraufnahme eines Stoffes aus der Luft wird **Adsorption**, der Vorgang der Wasserabgabe wird **Desorption** genannt. Beide Vorgänge werden durch den Begriff **Sorption** zusammengefasst (vgl. Willems/Schild/Dinter 2006: 5.26f).
Bei der Adsorption werden Wassermoleküle aus der Umgebungsluft an die Porenwandungen hygroskopischer, kapillarporöser Stoffe angelagert. Mit steigender Luftfeuchtigkeit können sich die Moleküle in mehreren Schichten anlagern, bis die Poren vollständig mit Wasser gefüllt sind. Dies ist bei einer relativen Luftfeuchte von 1 (bzw. 100%) möglich. Der Stoff ist in diesem Zustand wassergesättigt, es liegt adsorbtiv ungebundenes Wasser vor. Dieser Zustand kann ab einer relativen Luftfeuchte von ca. 0,95 (bzw. 95%) eintreten.

Die Gleichgewichtsfeuchte eines Stoffes bei konstanter Temperatur und verschiedenen Luftfeuchten wird in der materialspezifischen **Sorptionsisotherme** dargestellt. Die Isothermen von Adsorption und Desorption unterscheiden sich dabei leicht.
Mit Hilfe der Sorptionsisotherme kann so von der relativen Luftfeuchte über bzw. in einem Probekörper auf dessen Feuchtegehalt geschlossen werden, vorausgesetzt, der Körper befindet sich mit seiner Umgebung im Gleichgewichtszustand.
Abbildung 2.1 zeigt den schematischen Verlauf einer Sorptionsisotherme. Sorptionsisothermen verlaufen stets durch den Koordinatenursprung, d.h. bei einer relativen Luftfeuchte von 0 ist auch in einem Körper, der sich mit seiner Umgebung im Gleichgewichtszustand befindet, keine Feuchtigkeit vorhanden. Er ist absolut trocken. Sorptionsisothermen können bis zu einer relativen Luftfeuchte von ca. 95% ermittelt werden. Bei höheren Luftfeuchten ist einerseits aufgrund der großen Steigung der Therme eine Bestimmung mit ausreichender Genauigkeit nicht mehr möglich, andererseits physikalisch auch nicht sinnvoll, da der Feuchtegehalt in diesem Bereich nicht mehr mit der relativen Luftfeuchte gekoppelt ist.
Während die Sorptionsisothermen poriger Baustoffe bei einer Luftfeuchte nahe 1 (bzw.100%) einen steilen Verlauf zeigen, ist derjenige von quellbaren Polymeren mehr oder minder flach.

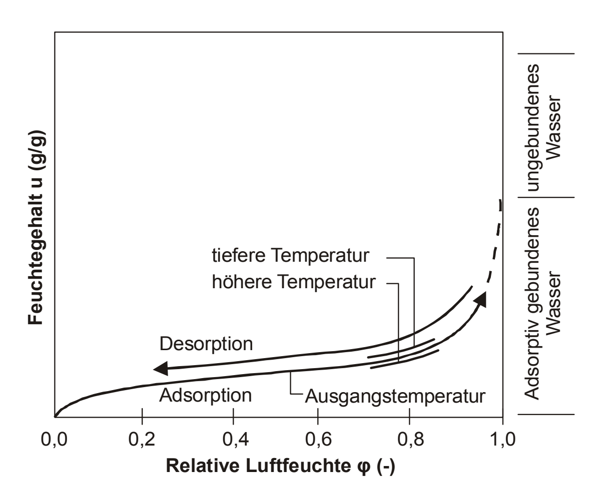


Abbildung 2.1: Sorptionsisotherme (schematisch) verändert nach Willems, Schild, Dinter (2006: 5.27)

Die Sorptionsisotherme der meisten porösen Baustoffe weisen einen S-förmigen Verlauf auf, wie in Abbildung 2.1 dargestellt. Ab ca. 95% relativer Luftfeuchte beginnt der überhygroskopische Bereich. Es ist nun ungebundenes Kapillarwasser im Baustoff vorhanden.
Sorptionsisothermen zeigen im in Gebäuden üblichen Temperaturbereich eine geringe Temperaturabhängigkeit, die im Allgemeinen für mineralische Baustoffe vernachlässigt werden kann. Es gilt: Je höher die Temperatur, umso „tiefer“ die Sorptionsisotherme und je niedriger die Temperatur, umso „höher“ die Sorptionsisotherme (vgl. Willems/Schild/Dinter 2006:5.26ff., Klopfer 2002: 347ff.).

Bei landwirtschaftlichen Produkten erfolgt die Bezeichnung der Gutfeuchte in wissenschaftlichen Arbeiten als Feuchtegrad X (Angabe als Absolutwert: Feuchtemasse dividiert durch die Trockenmasse), im Landhandel als Feuchtegehalt U (Maßeinheit %, Masse des Wassers dividiert durch die Feuchtmasse, Quotient multipliziert mit 100). Alternativ wird die Trockensubstanz TS (in g/kg, Trockenmasse dividiert durch Feuchtmasse, Quotient multipliziert mit 1000) angegeben.
Im Bauwesen wird die Baustofffeuchte durch den massebezogenen Feuchtegehalt u (Quotient der Masse des verdampfbaren Wassers und der Masse des trockenen Baustoffes als Absolutwert) nach DIN 12571: 2000 definiert. Diese Definition wurde in der vorliegenden Arbeit gewählt.

2.3 Material und Methode

2.3.1 Proben

Untersucht wurden insgesamt 24 Proben, jeweils drei Proben aus losem Weizen-, Gersten-, Roggen-, Dinkel- und Bohnenstroh sowie Hanffasern, Switchgras und Miscanthus. Die Proben werden bezeichnet nach: Probenmaterial (z.B. „Switchgras“) und Probennummer (z.B. „3“), ergibt z.B. „Switchgras 3“.

Die Trockenmasse der Proben lag zwischen 14,76 g (Switchgras 3) und 23,98 g (Weizen 3), die durchschnittliche Trockenmasse bei 20,11 g.
Das Stroh stammt aus Strohballen, die für die elastomechanischen Tests (siehe Teil II, Elastomechanisches Verhalten von Strohballen und Strohballenwänden) verwendet wurden. Es war sortenrein, wies keine Anteile von Beikraut auf, war zu Versuchsbeginn trocken und nach Geruchs- und Sichttest frei von Verfärbungen und Schimmel.
Die Proben wurden in gekennzeichnete perforierte Tüten eingebracht. Die Tüten wurden mit einem Kabelbinder verschlossen, um einen Masseverlust zu vermeiden und die Handhabung zu vereinfachen. Abbildung 2.2 zeigt die Sorptionsprobe Bohnenstroh 2.



Abbildung 2.2: Sorptionsprobe

2.3.2 Hilfsmittel und Messgeräte

Zur Erzeugung der unterschiedlichen Klimata wurde folgender Klimaschrank verwendet (Abbildung 2.3):

Hersteller:	WTB Binder Labortechnik GmbH
Modell:	KBF 240
Regelbereich Temperatur:	10-90°C
Toleranz Temperatur:	+/- 1°C
Regelbereich Feuchte:	0,1-0,9 rH
Toleranz Feuchte:	+/- 0,03 rH

Zur Masseermittlung wurde folgende Digitalwaage verwendet:

Hersteller:	Kern & Sohn GmbH
Modell:	Kern 572-37
Ablesbarkeit:	0,01g
Toleranz:	+/- 0,03g

2.3.3 Versuchsdurchführung

Die Messungen wurden nach dem Klimakammerverfahren aus DIN EN ISO 12571 durchgeführt.
Zunächst wurde die Trockenmasse der Proben ermittelt. Dazu wurden die Proben in den Klimaschrank eingebracht, bei 0% relativer Luftfeuchte und 96°C bis zur Massekonstanz getrocknet und gewogen.
Dann wurde die Temperatur auf 15°C und die relative Luftfeuchte auf 25% eingestellt und die Proben in diesem Klima bis zur Massekonstanz gelagert und gewogen. Anschließend wurde die relative Luftfeuchte auf 40% erhöht, die Proben bis zur Massekonstanz gelagert und gewogen. Diese Prozedur wurde bei 55, 70 und 80% relativer Luftfeuchte wiederholt und abschließend bei 0% relativer Luftfeuchte und 96°C bis zur Massekonstanz getrocknet. Im Anschluss wurden die Messungen bei 30 und 40°C mit allen relativen Luftfeuchten wiederholt. Die Messungen dauerten insgesamt 71 Tage.



Abbildung 2.3: Sorptionsproben im Klimaschrank

2.3.4 Verwendete Formeln

Ermittlung des massebezogenen Feuchtegehaltes

Der massebezogene Feuchtegehalt wurde nach der in DIN EN ISO 12571 (2000) enthaltenen Formel für jede Probe in jedem Gleichgewichtszustand berechnet.

$$u = \frac{m - m_0}{m_0}$$

dabei ist:
u: Massebezogener Feuchtegehalt (kg/kg)
m: Masse des feuchten Körpers
m_0: Masse des trockenen Körpers

Für alle weiteren Betrachtungen wurde das arithmetische Mittel der massebezogenen Feuchtegehalte aus den 3 Proben einer Strohsorte herangezogen.

Ermittlung der Sorptionsisotherme nach der BET-Theorie

Die BET- Theorie wurde von Brunauer, Emmet und Teller (vgl. Kolpfer 2002: 348, Lohse 2002: 43) zur Erklärung und Berechnung von Sorptionsisothermen entwickelt. Die Sorptionsisotherme wurde danach wie folgt ermittelt:

$$u = u_m \cdot \frac{c \cdot \varphi}{1 - \varphi} \cdot \frac{1 - (n+1) \cdot \varphi^n + n \cdot \varphi^{n+1}}{1 + (c-1) \cdot \varphi - c \cdot \varphi^{n+1}}$$

dabei ist:

u: Massebezogener Feuchtegehalt (g/g),

u_m: Der Feuchtegehalt, der ausreicht, um die gesamte innere und äußere Oberfläche des Baustoffes mit einer monomolekularen Wasserschicht zu belegen – bestimmt die „Höhe" der Isotherme, nicht aber ihre Form (g/g),

c: Beschreibt die Energie, mit der die erste Wassermoleküllage an die Baustoffoberfläche gebunden ist – bestimmt die Steigung der Sorptionsisotherme im Koordinatenursprung (dimensionslos),

φ: Relative Luftfeuchte über bzw. in den Poren des Baustoffs im Gleichgewichtszustand (dimensionslos),

n: Mittlere Anzahl der Wassermoleküllagen, die die Oberfläche der Kapillaren bedeckt – bestimmt die Steilheit der Therme bei höheren Luftfeuchten (vgl. Kolpfer 2002: 248, Lohse 2002: 43).

Die Ermittlung der Parameter u_m, c und n erfolgte graphisch mit Hilfe des Tabellenkalkulationsprogramms MS Excel 2002. Dazu wurden die ermittelten massebezogenen Feuchtegehalte in ein Koordinatensystem eingetragen, dessen Abszisse (x-Achse) die relative Luftfeuchte φ (dimensionslos) und die Ordinate (y-Achse) den massebezogenen Feuchtegehalt u (g/g) angibt. Die o.g. Formel wurde als Kurve in das Diagramm implementiert und die Parameter u_m, c und n so lange variiert, bis die Kurve mit den gemessenen Punkten übereinstimmte.
Im Anschluss wurde die Formel mit einem Temperaturfaktor versehen, der es ermöglicht, die Sorptionsisotherme in Abhängigkeit von der Temperatur darzustellen.

2.4 Darstellung der Versuchsergebnisse

Die ermittelten Feuchtegehalte u und die nach der BET-Theorie ermittelten Sorptionsisothermen werden folgend anhand von Diagrammen und den Sorptionsgleichungen dargestellt. Details enthält Anhang I.2, *Zum Experiment Sorptionsisothermen*.

Abbildung 2.4 bis Abbildung 2.15 visualisieren die ermittelten Gleichgewichtsfeuchten für die untersuchten Stroh- und Pflanzenarten und stellen die Sorptionsisothermen nach der BET-Theorie für 15°C und 40°C dar.
Aus der BET-Theorie und dem Temperaturfaktor wurde nach den in Tabelle 2.1 dargestellten Gleichungen zur Berechnung des Feuchtegehaltes aus der relativen Luftfeuchte in Abgängigkeit von der Temperatur ermittelt.

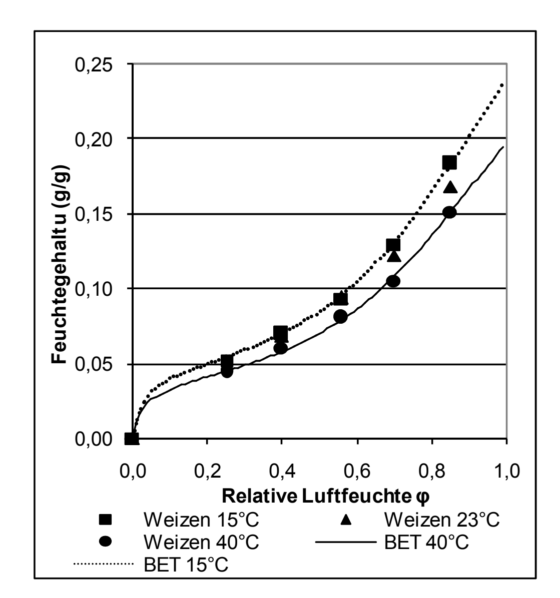


Abbildung 2.4: Sorptionsisothermen von Weizenstroh

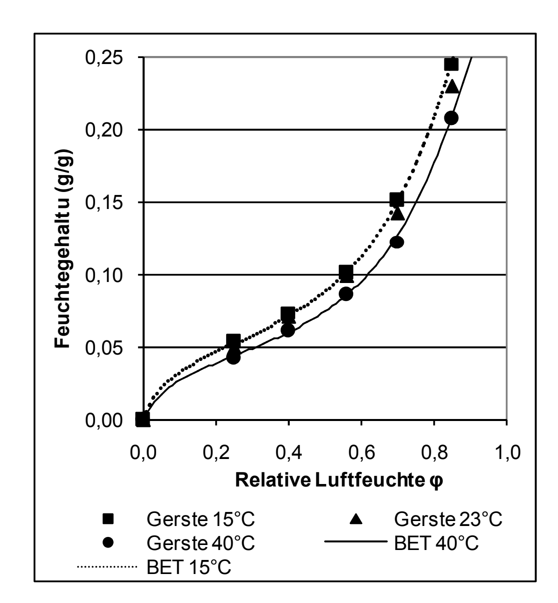


Abbildung 2.5: Sorptionsisothermen von Gerstenstroh

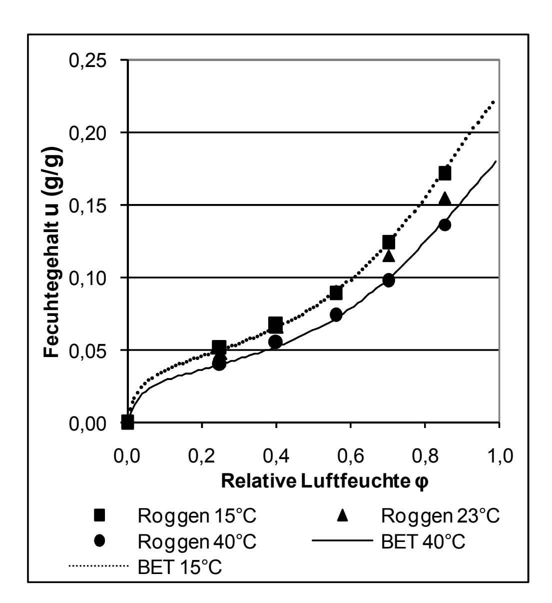


Abbildung 2.6: Sorptionsisothermen von Roggenstroh

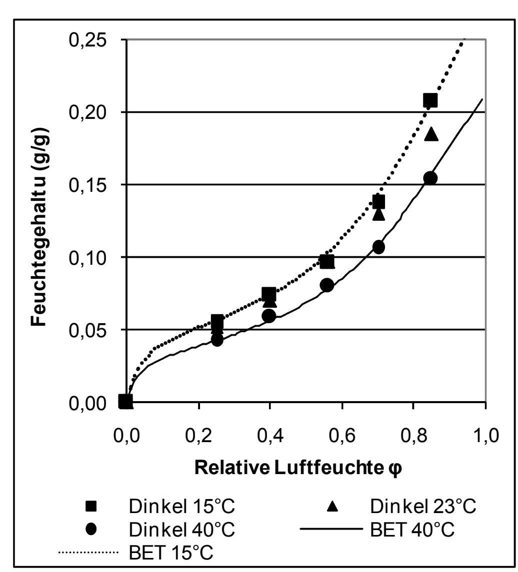


Abbildung 2.7: Sorptionsisothermen von Dinkelstroh

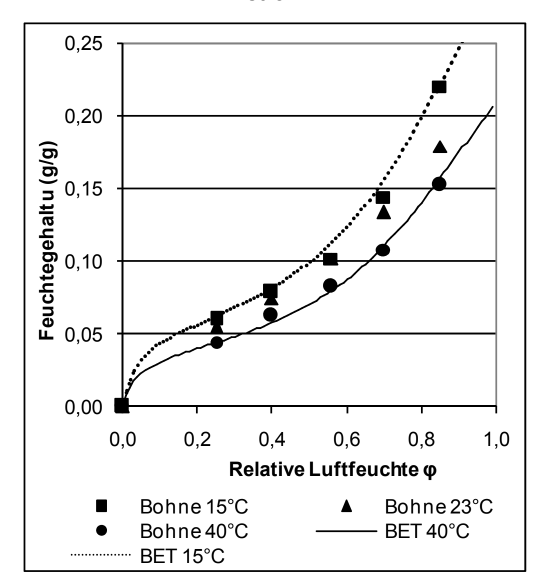


Abbildung 2.8: Sorptionsisothermen von Bohnenstroh

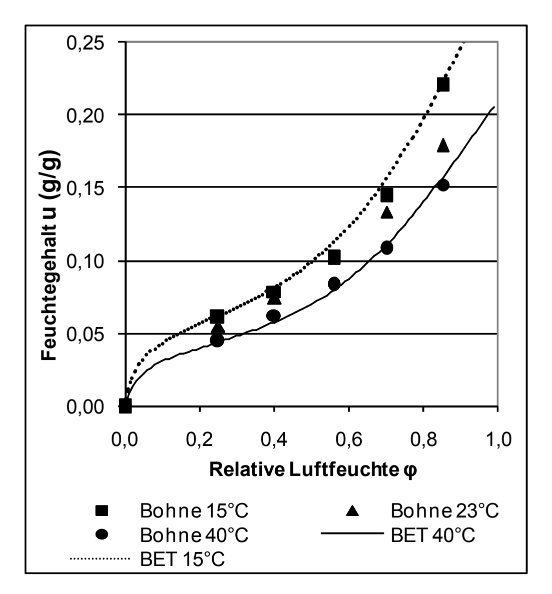


Abbildung 2.9: Sorptionsisothermen von Hanffasern

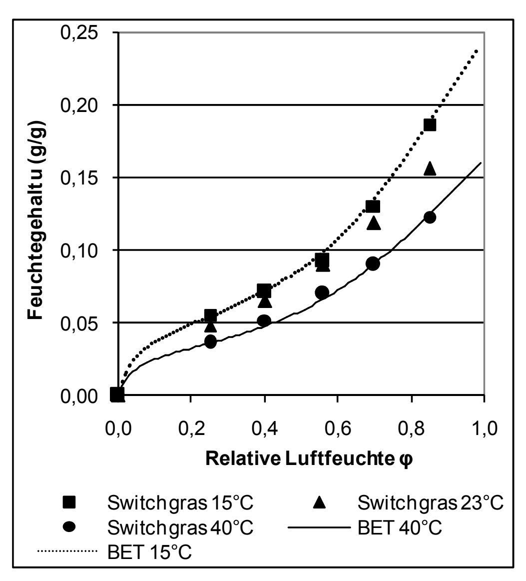


Abbildung 2.10: Sorptionsisothermen von Switchgras

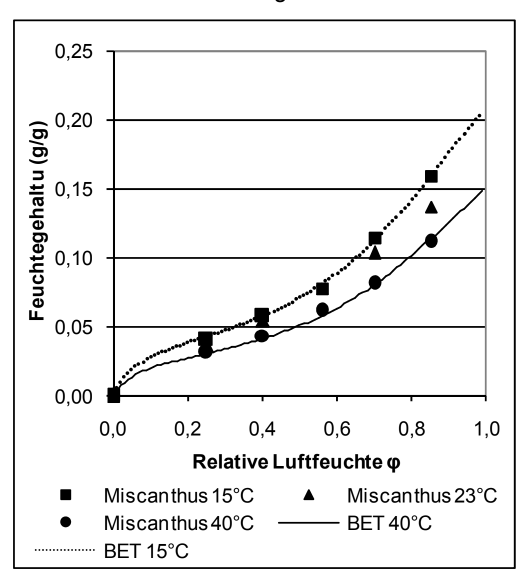


Abbildung 2.11: Sorptionsisothermen von Miscanthus

Tabelle 2.1: Gleichungen zur Berechnung des Feuchtegehaltes u der untersuchten Stroh- und Pflanzenarten nach der BET-Theorie

Stroh- bzw. Pflanzenart	Gleichung
Weizenstroh	$u = 0{,}036 \cdot \frac{40 \cdot \varphi}{1-\varphi} \cdot \frac{1 - 11 \cdot \varphi^{10} + 10 \cdot \varphi^{11}}{1 + 39 \cdot \varphi - 40 \cdot \varphi^{11}} \cdot (0{,}00017 \cdot (\theta - 40)^2 - 0{,}00421 \cdot (\theta - 40) + 1)$
Gerstenstroh	$u = 0{,}04 \cdot \frac{14 \cdot \varphi}{1-\varphi} \cdot \frac{1 - 16{,}5 \cdot \varphi^{15,5} + 15{,}5 \cdot \varphi^{16,5}}{1 + 13 \cdot \varphi - 14 \cdot \varphi^{16,5}} \cdot (0{,}00029 \cdot (\theta - 40)^2 - 0{,}00039 \cdot (\theta - 40) + 1)$
Roggenstroh	$u = 0{,}033 \cdot \frac{32 \cdot \varphi}{1-\varphi} \cdot \frac{1 - 11{,}1 \cdot \varphi^{10,1} + 10{,}1 \cdot \varphi^{11,1}}{1 + 31 \cdot \varphi - 32 \cdot \varphi^{11,1}} \cdot (0{,}00044 \cdot (\theta - 40)^2 + 0{,}00103 \cdot (\theta - 40) + 1)$
Dinkelstroh	$u = 0{,}0355 \cdot \frac{30 \cdot \varphi}{1-\varphi} \cdot \frac{1 - 12 \cdot \varphi^{11} + 11 \cdot \varphi^{12}}{1 + 29 \cdot \varphi - 30 \cdot \varphi^{12}} \cdot (0{,}00042 \cdot (\theta - 40)^2 + 0{,}00221 \cdot (\theta - 40) + 1)$
Bohnenstroh	$u = 0{,}0365 \cdot \frac{28 \cdot \varphi}{1-\varphi} \cdot \frac{1 - 11{,}5 \cdot \varphi^{10,5} + 10{,}5 \cdot \varphi^{11,5}}{1 + 27 \cdot \varphi - 28 \cdot \varphi^{11,5}} \cdot (0{,}00095 \cdot (\theta - 40)^2 + 0{,}00728 \cdot (\theta - 40) + 1)$
Hanffasern	$u = 0{,}035 \cdot \frac{28 \cdot \varphi}{1-\varphi} \cdot \frac{1 - 11{,}6 \cdot \varphi^{10,6} + 10{,}6 \cdot \varphi^{11,6}}{1 + 27 \cdot \varphi - 28 \cdot \varphi^{11,6}} \cdot (0{,}00044 \cdot (\theta - 40)^2 + 0{,}00103 \cdot (\theta - 40) + 1)$
Switchgras	$u = 0{,}0305 \cdot \frac{25 \cdot \varphi}{1-\varphi} \cdot \frac{1 - 10{,}7 \cdot \varphi^{9,7} + 9{,}7 \cdot \varphi^{10,7}}{1 + 24 \cdot \varphi - 25 \cdot \varphi^{10,7}} \cdot (0{,}00066 \cdot (\theta - 40)^2 + 0{,}00346 \cdot (\theta - 40) + 1)$
Miscanthus	$u = 0{,}027 \cdot \frac{18 \cdot \varphi}{1-\varphi} \cdot \frac{1 - 11{,}2 \cdot \varphi^{10,2} + 10{,}2 \cdot \varphi^{11,2}}{1 + 17 \cdot \varphi - 18 \cdot \varphi^{11,2}} \cdot (0{,}00038 \cdot (\theta - 40)^2 + 0{,}00644 \cdot (\theta - 40) + 1)$
dabei ist: u: Massebezogener Feuchtegehalt (g/g); φ: Relative Luftfeuchte im Stroh (-); θ: Temperatur im Stroh (°C)	

2.5 Diskussion und Folgerungen

2.5.1 Vergleich der untersuchten Strohsorten und Pflanzen

Bei der Betrachtung von Abbildung 2.12 fällt zunächst auf, dass alle Sorptionsisothermen nah bei einander liegen, es also keine signifikanten Unterschiede zwischen den untersuchten Pflanzen gibt, was nicht weiter verwunderlich ist, da alle Pflanzen außer Hanf und Bohnenstroh zur Familie der Süßgräser gehören und daher Ähnlichkeiten nahe liegen.
Bei niedrigeren Luftfeuchten liegen die Isothermen näher zusammen. Die Unterschiede nehmen mit steigender Luftfeuchte zu.

Auffällig ist der hohe Feuchtegehalt von Gerstenstroh bei höheren Luftfeuchten. Dieser stimmt mit den Untersuchungen von Ashour (2003) überein, der bei Gerstenstroh eine höhere Gleichgewichtsfeuchte feststellte als bei Weizenstroh.
Miscanthus weist die niedrigsten der dargestellten Gleichgewichtsfeuchten über das gesamte untersuchte Spektrum auf. Bei Miscanthus wurde eine höhere Dichte festgestellt als bei den anderen Proben. Dies impliziert eine kleinere Innenoberfläche und kann als Erklärung für die niedrigeren Gleichgewichtsfeuchten dienen.

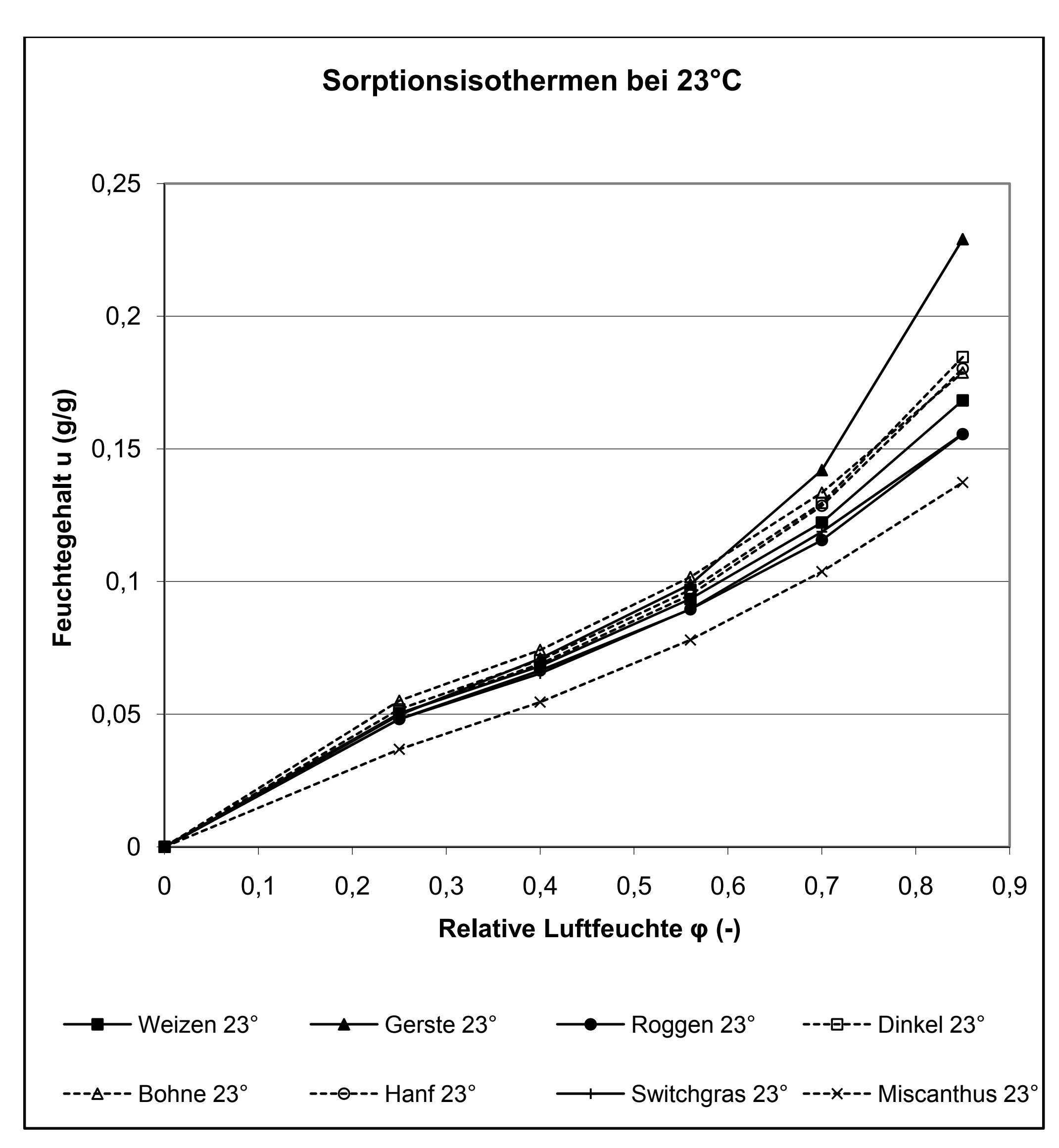


Abbildung 2.12: Sorptionsisothermen der untersuchten Pflanzen

2.5.2 Vergleich mit früheren Untersuchungen

Abbildung 2.13 vergleicht die Sorptionsisothermen von Weizenstroh von Minke/Mahlke (2004) und Ashour (2003) sowie die Isotherme „Straw“ von King (2006) mit der in dieser Arbeit ermittelten Isotherme von Weizenstroh. Bei allen Isothermen ist der charakteristische S-förmige Verlauf zu beobachten, der bei Ashour besonders ausgeprägt ist.
Alle Isothermen liegen bei ca. 20% relativer Luftfeuchte nah beieinander, unterscheiden sich mit zunehmender Luftfeuchte zunächst immer stärker, verdichten sich dann bei ca. 60% relativer Luftfeuchte und fächern sich ab diesem Punkt wieder auf.
Auch wenn alle Sorptionsisothermen recht ähnlich sind, muss angemerkt werden, dass die Sorptionsisothermen der verschiedenen Stroharten, welche in dieser Arbeit untersucht wurden, besonders im Bereich zwischen 40 und 60% relativer Luftfeuchte ähnlicher sind als die in Abbildung 2.13 dargestellten Isothermen der gleichen Strohart aus unterschiedlichen Untersuchungen.

Abbildung 2.14 vergleicht die Sorptionsisothermen von Gerstenstroh von Ashour (2003), und die Isotherme „Straw“ von King (2006) mit der in dieser Arbeit ermittelten Isotherme von Gerstenstroh.
Die Isothermen verhalten sich zueinander ähnlich wie die von Weizenstroh. Bei Gerstenstroh stellen sich höhere Gleichgewichtsfeuchten ein als bei Weizenstroh. Dies ist im Vergleich der jeweiligen Sorptionsisotherme mit der in beiden Abbildungen vorhandenen Isotherme „Straw“ aus King (2006) gut zu erkennen.

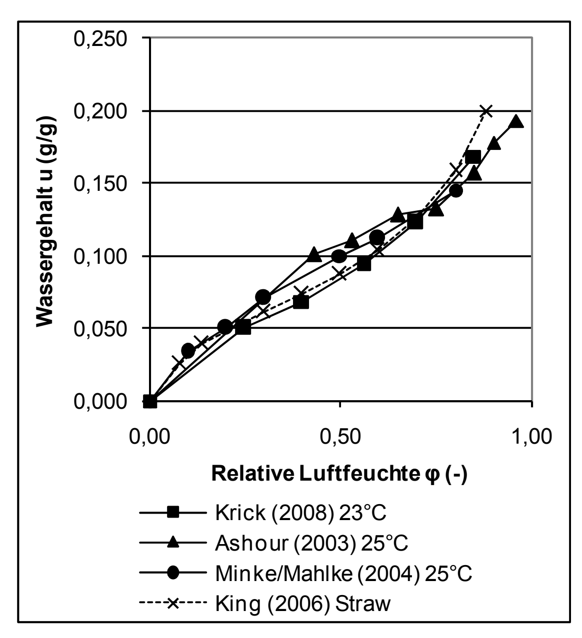


Abbildung 2.13: Sorptionsisothermen von Weizenstroh

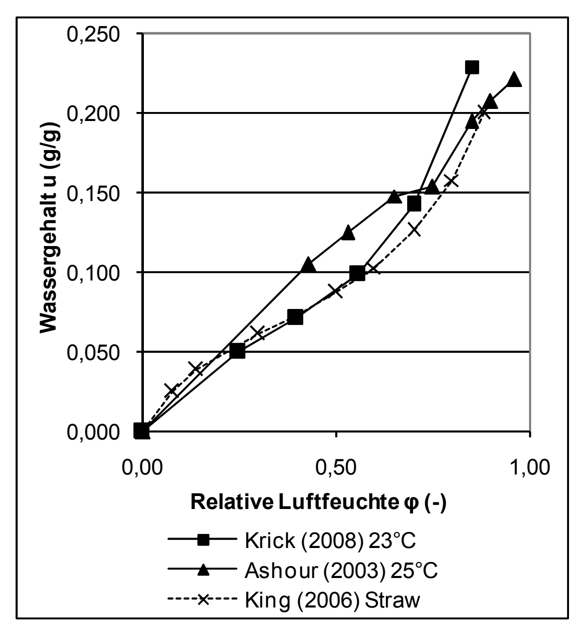


Abbildung 2.14: Sorptionsisothermen von Gerstenstroh

Abbildung 2.15 vergleicht die Sorptionsisothermen von Roggenstroh von Minke/Mahlke (2004), die Isotherme „Straw" von King (2006) mit der in dieser Arbeit ermittelten Isotherme von Roggenstroh.
Auffällig ist, dass die Roggenstrohisothermen aus den unterschiedlichen Untersuchungen zwischen 20 und 80% relativer Luftfeuchte nahezu parallel verlaufen, die Isotherme aus Minke/Mahlke (2004) jedoch etwa 3 Masseprozent über der Sorptionsisotherme liegt, die in der vorliegenden Arbeit ermittelt wurde.

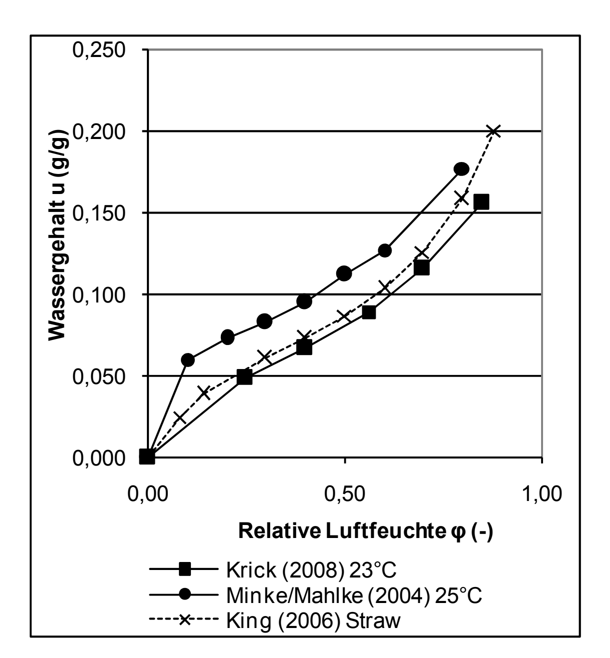


Abbildung 2.15: Sorptionsisothermen von Roggenstroh

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Sorptionsisothermen aller untersuchten Pflanzenarten einen ähnlichen Verlauf aufweisen.
Die Differenzen zwischen den besprochenen Untersuchungen legen die Vermutung nahe, dass die Ergebnisse der Sorptionsmessungen mehr von den Test- Setups und weiteren unbekannten Faktoren abhängen als von der Strohart. Weitere Differenzen können sich aus dem Messfehler ergeben, der sich nach DIN 12571 für die durchgeführten Untersuchungen wie folgt berechnet:

$$\frac{\Delta u}{u} = \pm 0{,}0002 \frac{m_0}{m - m_0}$$

Bei niedriger Temperatur stellen sich höhere Gleichgewichtsfeuchten ein als bei hohen Temperaturen. Dieser Effekt ist im Gegensatz zu den Unterschieden bei mineralischen Materialien hinsichtlich der Temperaturabhängigkeit der Sorptionsisothermen nicht zu vernachlässigen.

3 Zur Gefährdung von Stroh durch Schimmelpilze

3.1 *Zu den Risiken durch Schimmelpilze*

Wie bei allen organischen Baustoffen setzen auch bei Strohballen Rottprozesse und Schimmelpilzbildungen ein, wenn entsprechende Bedingungen wie hohe Luftfeuchte und begünstigende Temperaturen vorliegen. Schimmelpilze können organische Materialien zersetzen und sich schädigend auf die Bauwerksstruktur und deren Tragwerk auswirken. Ein weiteres Risiko ist die Freisetzung toxischer Substanzen durch Schimmelpilze, die sich negativ auf die Gesundheit der Bewohner eines befallenen Bauwerkes auswirken kann. Vgl. Sedlbauer (2001: 19f) können Schimmelpilze Mykosen[2], Mykotoxikosen[3] und Mykogene Allergien[4] verursachen.
Nicht alle Schimmelpilze sind gleich gefährlich. Sedlbauer (2001: 52f) schlägt folgende Gefährdungsklassen vor:

A: Pilz ist toxisch und darf in einem Wohnraum nicht auftreten
B: Pilz ist bei langer Expositionszeit gesundheitsgefährdend
C: Pilz ist nicht gesundheitsgefährdend, führt aber zu wirtschaftlichen Schäden

3.2 *Zu den Wachstumsbedingungen von Schimmelpilzen*

Sedlbauer (2001: 22, 32) gibt an, dass Schimmelpilze in einem Temperaturbereich von 0°C - 50°C gedeihen können. Dabei ist die Geschwindigkeit des Biomasseaufbaus von Pilzen temperaturabhängig und erreicht, abhängig von der Pilzart, ihr Maximum zwischen 20 und 30°C. In vielen Fällen entscheiden Temperaturdifferenzen von wenigen Kelvin darüber, ob eine Keimung der Schimmelsporen stattfindet oder nicht. Nach der Keimung und einem anfänglichen Myzelwachstum[5] sind Schimmelpilze relativ unempfindlich gegen ungünstige Temperaturen. Treten ungünstige Temperaturen ein, verlangsamt der Pilz sein Wachstum oder stellt es ein. Verlagert sich die Temperatur wieder in den Wachstumsbereich, setzt der Pilz seine Aktivität fort.

Das entscheidende Kriterium für das Wachstum von Schimmelpilzen ist laut Sedlbauer (2001: 24, 32) die zur Verfügung stehende Feuchte. Diese wird in der Biologie als Wasseraktivität, a_W-Wert, bezeichnet und entspricht der nicht prozentualen Darstellung der relativen Luftfeuchte φ über der Oberfläche bzw. in den Kapillaren eines Stoffes im Gleichgewichtszustand.
Die optimalen Feuchtigkeitsbedingungen sind abhängig von der Schimmelpilzart. Xerophile Pilze gedeihen auch unter einer relativen Luftfeuchte von $\varphi = 0{,}85$, Mesophile Pilze wachsen bei relativen Luftfeuchten zwischen $\varphi =$ 0,85 und 0,95, Hydrophile Pilze benötigen relative Luftfeuchten von $\varphi > 0{,}95$. In der Praxis kann davon ausgegangen werden, dass unter relativen Luftfeuchten von $\varphi < 0{,}7$ kein Schimmelpilzwachstum erfolgt. Generell gilt: die Sporenkeimung bedarf einer höheren Feuchtigkeit als das Myzelwachstum. Dadurch ist sichergestellt, dass der Pilz nach der Keimung auch wachsen kann. Vgl. Sedlbauer (2001: 24, 32), Sedlbauer/Krus (2002a).
Die oben genannten minimalen Werte für das Wachstum von Schimmelpilzen gelten nur unter optimalen Temperaturbedingungen. Bei Abweichungen vom Optimum in beide Richtungen findet bei den minimalen Werten für die Feuchtigkeit kein Wachstum statt.

Alle bisher genannten Werte für Auskeimung und Wachstum von Schimmelpilzen in unterschiedlichen Klimata beziehen sich auf das Wachstum auf einem optimalen Nährmedium unter Laborbedingungen. Die meisten Baustoffe sind als Nährmedium weniger gut geeignet als das im Laborversuch verwendete Substrat. Je mehr ein Substrat vom optimalen Nährmedium abweicht, umso höher ist die minimale Auskeimungsfeuchte bei optimaler Temperatur. Vgl. Sedlbauer (2001: 26f, 55, 60).
In Sedlbauer (2001: 55, 60) wird eine Einteilung von Baustoffen in vier Substratgruppen 0-III vorgenommen. Der Substratgruppe 0, optimaler Nährboden, gehören biologische Vollmedien an. Zur Substratgruppe I, biologisch verwertbare Substrate, gehören Bauprodukte aus gut abbaubaren Rohstoffen, z.B. Tapeten und Gipskarton. Substratgruppe II, Substrate mit porigem Gefüge, umfasst Putze, mineralische Bauprodukte und Dämmstoffe, sofern sie nicht unter I fallen. Substratgruppe III, Inerte Substrate, sind Metalle, Folien, Gläser und Fliesen.

---

[2] Pilzwachstum in oder am menschlichen Wirt verursacht eine Schwächung des Immunsystems des Wirtes.
[3] Vergiftung durch toxische Stoffwechselprodukte von Pilzen. Aufnahme durch verschimmelte Lebensmittel oder Inhalation kontaminierter Stäube. Kann bei Langzeitexposition chronische Vergiftungserscheinungen durch Akkumulation der Toxine mit möglicher Todesfolge hervorrufen.
[4] Kann sich z.B. durch Bronchitis, Asthma oder Neurodermitis äußern.
[5] Gesamtheit der Pilzfäden

Eine weitere Einflussgröße ist die Zeit. Je kürzer ein Substrat einem Klima ausgesetzt wird, in dem Schimmelwachstum möglich ist, umso unwahrscheinlicher ist ein Wachstum.
Zur Vorhersage von Schimmelpilzwachstum sind komplexe instationäre Betrachtungen, in die Temperatur, Feuchte, Nährmedium und die Zeit eingehen, nötig. Vorhersageprogramme wie z.B. WUFI-Bio sind in der Lage, basierend auf mathematischen Modellen von Schimmelsporen solche Prognosen zu liefern.

3.3 Schimmelpilze auf Stroh und deren Wachstumsbedingungen

Sedlbauer (2001: 13ff) stellt, basierend auf einer umfassenden Literaturrecherche, eine Liste von Schimmelpilzen mit deren Gefährdungsklassen, Wachstumsbedingungen und bevorzugten Nährmedien auf. Pilze, welche auch auf Heu und Stroh gedeihen, ihre Wachstumsbedingungen (soweit vorhanden) und Gefährdungsklassen sind in Tabelle 3.2 aufgeführt.
Es zeigt sich, dass die minimalen Sporenkeimungsbedingungen von Schimmelpilzen auf Stroh bei 5°C und einer relativen Luftfeuchte von 0,69, die minimalen Myzelwachstumsbedingungen bei -5°C und einer relativen Luftfeuchte von 0,70 liegen.
Pilze, die bei kurz oder langfristiger Exposition gesundheitsschädlich wirken können, beginnen erst ab einer relativen Luftfeuchte von 0,8 auszukeimen.

Nach Auskunft von Scharmer (2007) wurde Stroh durch das Fraunhofer Institut für Bauphysik in Holzkirchen in die Substratgruppe I eingeordnet. Bei Substratgruppe I beginnt eine Sporenauskeimung bei 30°C ab einer relativen Luftfeuchte von 0,76, ein Myzelwachstum bei einer relativen Luftfeuchte von 0,75.
Damit ist ein Schimmelpilzbefall von Strohballenkonstruktionen, bei denen die relative Luftfeuchte in der Konstruktion unter 0,75 bleibt, ausgeschlossen.
Daraus ergeben sich anhand der in Kapitel 2 ermittelten Sorptionsisothermen die in Tabelle 3.1 dargestellten massebezogenen Feuchtegehalte für die untersuchten Medien, bis zu denen ein Schimmelpilzbefall ausgeschlossen werden kann.

Tabelle 3.1: Maximaler garantiert schimmelfreier Feuchtegehalt der untersuchten Substrate

Substrat	**Maximaler garantiert schimmelfreier Feuchtegehalt u (g/g)**
Weizen	0,13
Gerste	0,15
Roggen	0,12
Dinkel	0,13
Bohnenstroh	0,13
Hanffasern	0,12
Switchgras	0,10
Miscanthus	0,09

Tabelle 3.2: Auf Heu/Stroh vorkommende Schimmelpilze. Daten nach Sedlbauer (2001: 13ff., 15f, 24)

Pilzspezies	**Gefährdungsklasse**	**Temperatur °C** Sporen-keimung (min/opt/max)	**Temperatur °C** Myzelwachs-tum (min/opt/ max)	**Rel. Luftfeuchte (-)**[1] Sporen-keimung (min/opt)	**Rel. Luftfeuchte (-)**[1] Myzel-wachs-tum (min/opt)
Aspergillus fumigatus	A	10/40/50	10/43/57	0,8/0,97	0,82/0,97
Paecilomyces variotii	A	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Stachybotrys atra	A	5/25/40	2/23/37	0,85/0,97	0,89/0,98
Ungünstigste Werte Klasse A		**5/25/40**	**2/23/37**	**0,85/0,97**	**0,82/0,97**
Bipolaris sorokiniana	B	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Cladosporium cladosporioides	B	k.A.	-5/28/32	0,85/k.A.	0,84/0,96
Scopulariopsis brevicaisalis	B	k.A.	7/30/37	k.A.	0,85/0,94
Scopulariopsis fusca	B	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Wallemia sebi	C	-/30/-	5/30/40	0,69/k.A.	0,70/k.A.
Ungünstigste Werte Klasse B/C		**-/30/-**	**-5/28/32**	**0,69/-**	**0,70/-**
Cladosporium spezies	-	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.

[1]: Angabe im Original in %

4 Zur Herstellung von Strohballen

4.1 Stand der Technik

4.1.1 Arten von Strohballenpressen

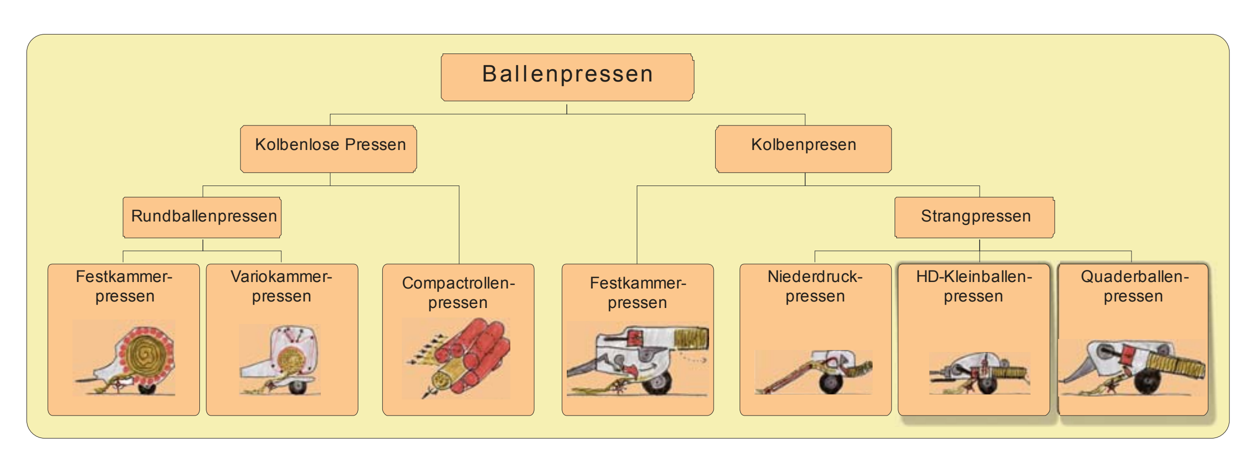


Abbildung 4.1: Einteilung von Strohballenpressen in kolbenlose Pressen und Kolbenpressen

Ballenpressen lassen sich nach der Art der Pressgutverdichtung in Kolbenpressen und kolbenlose Pressen einteilen (siehe Abbildung 4.1). Die Ballen kolbenloser Pressen fanden im Strohballenbau bisher keine direkte Anwendung, jedoch lassen sich Rundballen zu HD-Ballen umpressen. Kolbenpressen können in Strangpressen und Festkammerpressen eingeteilt werden. Festkammerpressen werden nicht mehr hergestellt. Strangpressen stellen kontinuierlich einen durch den Presskolben verdichteten Strohstrang her, der in einstellbaren Intervallen mit zwei oder mehr Garnbindungen abgebunden wird. Niederdruckpressen werden nicht mehr hergestellt. Für das Bauen mit Strohballen sind die Ballen von HD-Kleinballenpressen und Quaderballenpressen interessant. Tabelle 4.1 zeigt eine Übersicht über marktgängige HD- und Q-Ballenpressen. In Anhang I.3, *Recherche marktüblicher HD- und Q-Ballenpressen und ihrer Eigenschaften*, werden diese Pressen ausführlicher dargestellt.

Mit **HD-Kleinballenpressen** (Hochdruck-Kleinballenpressen) können laut Hersteller Ballen mit einer Dichte von bis zu 120 kg/m³ produziert werden (durch Veränderungen an der Presse und Optimieren des Pressvorganges lassen sich höhere Dichten erzielen, siehe Kapitel 4.2). Die Abmessungen der Ballen variieren je nach Hersteller im Bereich 35x50x60-130 cm. Klassifizierendes Kennzeichen ist neben der geringen Größe der Ballen die Aufnahme des Schwades („Pressguthaufen" auf dem Feld) seitlich des Schleppers und die 2-fache Bindung. HD-Ballenpressen finden heute vor allem in kleinen landwirtschaftlichen Betrieben Anwendung. Die Verkaufszahlen sind stark rückläufig. Viele Hersteller haben die Produktion zugunsten von Rund- und Quaderballenpressen eingestellt.

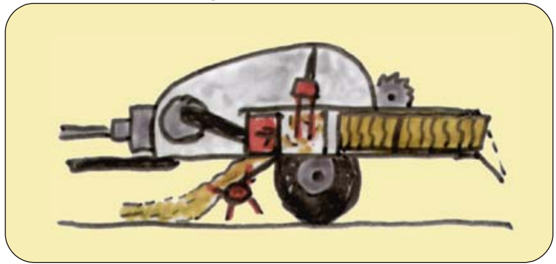


Abbildung 4.2: Hochdruck-Kleinballenpresse

Quaderballenpressen (Q-Ballenpressen, Großballenpressen, Großpackenpressen) stellen die neueste Entwicklung dar. Mit ihnen lassen sich Pressdichten bis zu 220 kg/m³ bei Abmessungen zwischen 80-120x70-130x80-300 cm realisieren. Die Ballen werden vier- oder sechsfach gebunden. Verwendet werden sie vor allem von sehr großen landwirtschaftlichen Betrieben, Maschinenringen oder landwirtschaftlichen Lohnunternehmen. In den USA sind sogenannte 3-String-Baler marktgängig, die dreifach gebundene Ballen mit Abmessungen von z.B. 41x56x46-132 cm herstellen.

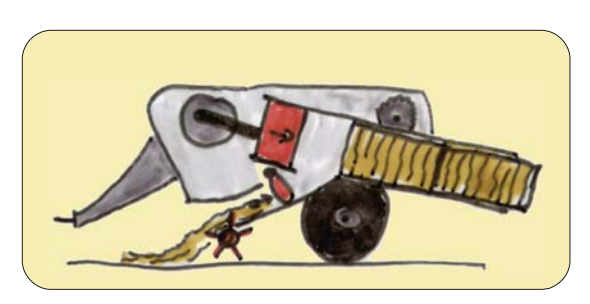


Abbildung 4.3: Quaderballenpresse

Tabelle 4.1 Übersicht über HD-und Q-Ballenpressen

Hersteller	Modell	Ballenabmessungen hxbxl (cm)	Dichte (kg/m³)
Welger, Deutschland	AP 530 AP 630	36x48x50-120	110
	AP 730 AP 830	36x49x50-120	120
John Deere, USA	349 359	36x46x30-130	100
	459		115
Massey Ferguson (AGCO), USA	MF 1835		k.A.
	MF 1837	36x46x31-132	k.A.
	MF 1839		k.A.
Freeman, USA	300 Series	38x56x46-132 41x56x46-132	270 (in Alfalfa)
New Holland, USA	BB900	38x56x31-132	270 (in Alfalfa)
Hesston (AGCO), USA	4690S	37x58x31-132	164
Welger, Deutschland	D4006 D6006	70x80x90-250 70x120x90-250	150
Krone, Deutschland: BiG Pack	890	80x90x100-720	
	1270[1]	70x120x100-270	150
	1290	90x120x100-270	
	1290HDP	90x120x100-320	220
	12130	130x120x100-270	150
Claas, Deutschland: Quadrant	1150	50x80x70-240	170
	2100 R	70x80x120-250	190
	2200 R	70x120x90-300	200
	3400	100x120x100-300	k.A.

[1]: Ausrüstbar mit dem MultiBale-Modul; Zu den Quellen siehe Anhang I.4

4.1.2 Funktionsweise von HD-Ballenpressen

Die Funktionsweise von HD-Ballenpressen wird am Beispiel der Welger AP 53 erläutert. Die Kenndaten dieser Maschine können Tabelle 4.2 entnommen werden. Die eingeklammerten Buchstaben in der Beschreibung beziehen sich auf die Beschriftung von Abbildung 4.4.

1. Die Presse fährt von einem Schlepper gezogen über den Schwad.
2. Die Pick-Up nimmt den Schwad auf (A).
3. Der Querförderer (B) schiebt das Stroh zum Raffer (C).
4. Die Rafferzinken befördern das Pressgut in den Presskanal (D).
5. Der Kolben (E) presst das Stroh mit 100 Stößen (Kolbenhüben) pro Minute gegen den zuvor gebundenen Ballen. Die 100 Kolbenhübe werden bei einer Zapfwellendrehzahl von 540 Umdrehungen pro Minute erreicht. Die Zapfwellendrehzahl ist (bei älteren Traktoren und einfachen Modellen) proportional zur Motordrehzahl und wird im optimalen Drehzahlbereich des Motors erreicht. Dieser Bereich ist auf dem Drehzahlmesser des Schleppers markiert, sodass der Fahrer in diesem Bereich fahren kann. Durch die Wahl der Gänge können verschiedene Geschwindigkeiten in diesem optimalen Drehzahlbereich gefahren werden. Bei jedem Hub legt der Kolben unabhängig von der eingebrachten Strohmenge den gleichen Weg zurück.
6. Symmetrisch angebrachte Riffelbleche hindern das Stroh am Zurückfedern.
7. Der Ballen schiebt sich gegen den Reibungswiderstand des Kanals, getrieben durch die Kolbenstöße unter dem Längennehmerrad (F) nach hinten. Durch Handkurbeln (G) kann der Presskanal in vertikaler Richtung verengt werden. Dadurch erhöht sich die Reibung im Presskanal, der Kraftaufwand zum Ausdrücken der Ballen steigt und mit ihm die Pressdichte.
8. Das Längennehmerrad (F) dreht sich mit dem Vorschub des Pressstranges. An der Sterngriffmutter (H) kann der Auslösezeitpunkt für die Bindevorrichtung eingestellt werden.
9. Ist die eingestellte Ballenlänge erreicht, wird die Bindevorrichtung ausgelöst. Die Nadelschwinge schießt nahe dem vorderen Umkehrpunkt des Kolbens noch oben, der Ballen wird gebunden
10. Der nächste Ballen schiebt den gebundenen Ballen weiter durch den Presskanal.

11. Je nach Ausrüstung der Presse fällt der gebundene Ballen am Ende des Presskanales zu Boden (**I**), wird über eine Ballenschurre auf einen nachfolgenden Anhänger geschoben oder durch eine Ballenschleuder auf den Anhänger geworfen.

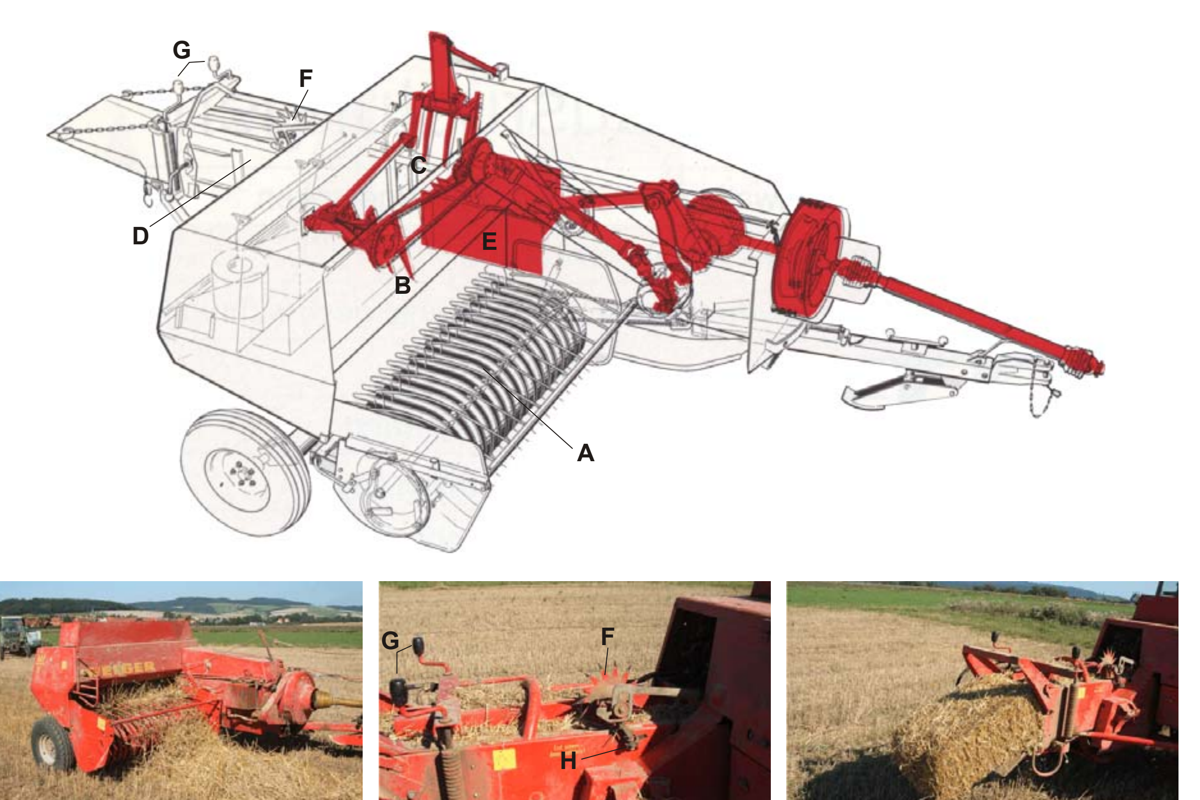


Abbildung 4.4: Zur Funktionsweise von HD-Ballenpressen (Zeichnung: Welger 8: 3, eigene Fotos, Beschriftung, Darstellung)

Tabelle 4.2 Technische Daten Welger AP 53 (Welger 1981: 2f)

Modell	Ballengröße (H x B x T cm)	Dichte (kg/m³)	Durchsatz (t/h)	Anzahl Knoter	Zapfw. Drehzahl (U/min)	Kolbenhubzahl (x/min)	Kraftbedarf (Zapfwelle, kW)
AP 53	36 x 48 x 50-120	k.A.	14 (Heu)	2	540	100	18

4.2 Experiment Baustrohballenherstellung

4.2.1 Motivation, Zielsetzung und Hypothesen

Anforderungen an Baustrohballen sind unter anderen eine möglichst hohe Dichte, Maßhaltigkeit, Oberflächenbeschaffenheit und Kantentreue (siehe Abbildung 4.5). Da Strohballen in der Praxis bezüglich der genannten Anforderungen oft Mängel aufweisen (siehe Abbildung 4.6), wurde experimentell untersucht, wie mit einer herkömmlichen HD-Ballenpresse für das Bauen geeignete Ballen hergestellt werden können. Ziel war es, die Ergebnisse des Experimentes in prägnanter, verständlicher Weise als Hilfestellung für zukünftige Baustrohballenhersteller darzustellen.

Für die Untersuchung der Zusammenhänge zwischen den Pressbedingungen (wie Fahrgeschwindigkeit, Presseneinstellungen, Kolbenhubzahl und verdichteter Pressgutmasse) und der Ballenqualität wurden Hypothesen aufgestellt und getestet. Die Hypothesen sind im Einzelnen:

1. **Die Pressdichte von HD-Ballen ist abhängig von der Fahrgeschwindigkeit des die Presse ziehenden Schleppers.** Erläuterungen: Aus der Literatur, z.B.

Gruber 2003, ist zu entnehmen, dass Pressdichte abhängig von der Fahrgeschwindigkeit der Presse sei und mit steigender Geschwindigkeit sinke. Folglich müssten bei langsamerer Fahrt dichtere, also bessere Ballen herzustellen sein.



Abbildung 4.5 Lockere Ballen mit unscharfen Kanten müssen aufwändig vorbereitet werden, um als Baustrohballen eingesetzt werden zu können. Notwendige Arbeiten sind das Trimmen (begradigen der Ballenenden), das Rasieren (entfernen überstehender Halme vor dem Verputzen) und evtl. ein Nachverdichten. Ballen unter einer Rohdichte von 110 kg/m² sollten für das lasttragende Bauen nicht verwendet werden.



Abbildung 4.6 Bei dichten Ballen mit scharfen Kanten ist die Vorbereitung deutlich weniger aufwändig.

2. **Die Pressdichte von HD-Ballen ist auch abhängig von der Masse des pro Kolbenstoß komprimierten Strohes.**
   Erläuterungen: Wie in Abschnitt 4.1.2 erläutert, legt der Kolben pro Kolbenhub, unabhängig von der durch den Raffer eingebrachten Strohmenge, den gleichen Weg zurück. Das eingebrachte Stroh würde folglich unabhängig von der vorhandenen Menge stets auf das gleiche Volumen verdichtet werden, wenn die Presskammer konstant bliebe, der bereits gepresste Strohstrang nicht durch den Presskanal hach hinten herausgepresst werden würde. Es soll geklärt werden, ob die Erhöhung der Dichte durch ein größeres Strohvolumen pro Kolbenstoß durch den zu erwartenden beschleunigten Vorschub des Pressstranges kompensiert wird.
3. **Die Ballendichte kann durch eine seitliche Verengung des Presskanals erhöht werden.**
   Erläuterungen: Eine seitliche Verengung des Presskanals erhöht den Widerstand gegen das Auspressen des Strohs, die Pressdichte steigt.

4.2.2 Material und Methode

Material

Ballenpresse: Welger AP 53, Funktionsweise und Spezifikationen siehe 4.1.2.
Schlepper: Fendt Turbomatik Farmer 305 CSA
Messgeräte: Gliedermaßstab zur Längenmessung der Ballen, Maßband zum Abmessen der Parzellenlänge, digitale Anglerwaage zur Massebestimmung
Weitere Hilfsmittel: Ballengarn 400 m/kg
Pressgut: Mehrfach gewendetes und geschwadetes, trockenes Weizenstroh, das seit dem Dreschen nicht mehr beregnet wurde. Das Dreschen erfolgte mit einem Tangentialdrescher (Claas Compact 30) und lag zum Zeitpunkt des Pressens ca. 24 Stunden zurück.

Methode

Ermittlung der Ballendichte ρ: Die Ballendichte ρ (kg/m³) ist der Quotient aus der Ballenmasse m (kg) dividiert durch das Produkt aus Ballenlänge l, -breite b und –höhe h (m):

$$\rho = \frac{m}{l \cdot b \cdot h}$$

Ermittlung der Strohmasse eines Schwades m_S: Die Strohmasse eines Schwades m_S (kg) ist die Summe der Massen aller Ballen m_B (kg), die aus diesem Schwad gepresst wurden:

$$m_s = \sum m_B$$

Ermittlung der Kolbenhübe pro Schwad K_S: Die Kolbenhübe pro Schwad K_S (-) sind das Produkt aus der Hubzahl der Presse pro Minute K/t (1/min) und der für das Pressen des Schwades benötigten Zeit t_S (min):

$$K_S = \frac{K}{t} \cdot t_S$$

Ermittlung der pro Kolbenstoß verdichteten Strohmasse m_K: Die pro Kolbenstoß verdichtete Strohmasse m_K (kg) ist der Quotient aus der Masse m_S (kg) des entsprechenden Schwades dividiert durch die Anzahl der Kolbenhübe K_S (-) des gleichen Schwades:

$$m_K = \frac{m_S}{K_S}$$

Versuchsablauf für Hypothese 1: Bei sonst gleichen Einstellungen der Presse, optisch gleichen Schwaden und gleichen Schwadlän-

gen von je 70 m wurde bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten gepresst. Dabei wurde nicht auf die Motordrehzahl des Schleppers geachtet. Die Ballen wurden gewogen und vermessen. Die Ballendichte ρ wurde nach o.g. Formel ermittelt.

Versuchsablauf für Hypothese 2: Bei gleichen Einstellungen der Presse, gleicher Geschwindigkeit und Motordrehzahl wurden unterschiedlich große Schwade gleicher Länge (70 m) gepresst. Dabei wurde die Motordrehzahl so gewählt, dass die Zapfwellendrehzahl 540 U/min betrug. Die produzierten Ballen wurden gewogen und vermessen. Anschließend wurden nach o.g. Formeln die Ballendichte und die pro Kolbenstoß verdichtete Strohmasse ermittelt.

Versuchsablauf für Hypothese 3: Bei gleichen Einstellungen der Presse, gleich großen Schwaden gleicher Länge (70 m) gleicher Fahrgeschwindigkeit und Zapfwellendrehzahl wurden zunächst auf jeder Seite des Presskanales drei Sperrholzbretter à 0,9 cm, welche an der dem Presskolben zugewandten Seite im 30° Winkel zuliefen, montiert. Die Bretter reichten über die gesamte Höhe des Presskanales und hatten eine Länge von 27 cm. Unter diesen Bedingungen wurde ein Schwad gepresst. Die produzierten Ballen wurden gewogen, vermessen, ihre Einzeldichten sowie die durchschnittliche Dichte ermittelt. In einem weiteren Versuch wurde an jeder Seite des Presskanals jeweils ein Brett entfernt und der Versuch wiederholt. In weiteren Versuchen wurde die Anzahl der Bretter um jeweils 1 Brett pro Seite verringert bis der letzte Schwad schließlich ohne Bretter gepresst wurde.



Abbildung 4.7 Symmetrische Verengung des Presskanals durch Einschrauben von Holzbrettern

4.2.3 Darstellung und Diskussion der Versuchsergebnisse

Zu Hypothese 1 – Abhängigkeit der Ballendichte von der
keit: Abbildung 4.8 visualisiert die Testergebnisse zu Hypothese 1. Eine Korrelation zwischen Fahrgeschwindigkeit und Ballendichte ist nicht evident, die Hypothese konnte nicht verifiziert werden.

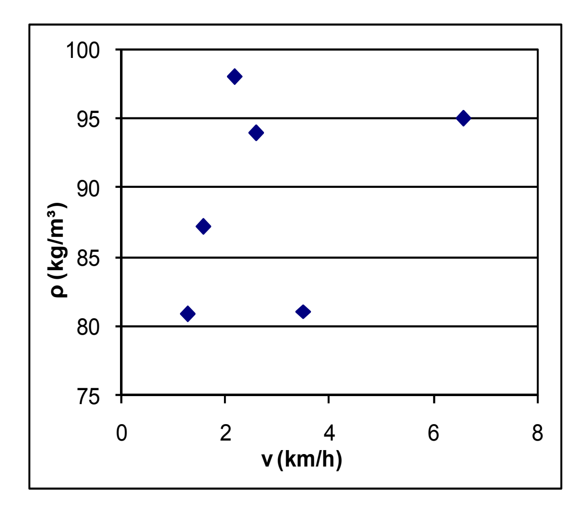


Abbildung 4.8: Ballendichte ρ in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit v

Zu Hypothese 2 – Abhängigkeit der Ballendichte von der pro Kolbenstoß verdichteten Strohmasse: Abbildung 4.9 visualisiert die Testergebnisse zu Hypothese 2. Eine Korrelation zwischen Ballendichte und der pro Kolbenstoß verdichteten Strohmasse ist deutlich. Der Pressstrang wird also nicht in gleichem Maß ausgedrückt wie die Komprimierung des Strohs durch ein erhöhtes Volumen steigt.

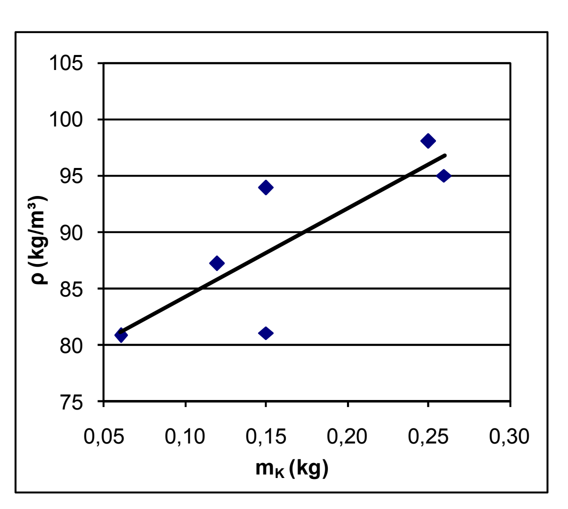


Abbildung 4.9: Ballendichte ρ in Abhängigkeit von der pro Kolbenstoß verdichteten Strohmasse m_K

Wie unter *Methode* erläutert wurde die Erhöhung der Strohmasse pro Kolbenstoß durch das Pressen eines größeren Schwades bei gleicher Zapfwellendrehzahl und Geschwindigkeit erreicht. Eine Möglichkeit zur Erhöhung der Strohmasse bei gleich großen Schwaden ist die Erhöhung der Fahrtgeschwindigkeit bei gleicher Zapfwellendrehzahl oder eine Verringerung der Zapfwellendrehzahl bei gleicher Geschwindigkeit. Bei Schleppern, deren Zapf-

wellendrehzahl direkt von der Motordrehzahl abhängt, bedeutet dies eine möglichst schnelle Überfahrt in einem möglichst niedrigen Gang. Unter dieser Prämisse ist die Ballendichte tatsächlich abhängig von der Fahrgeschwindigkeit (Hypothese 1). Jedoch steigt die Ballendichte unter diesen Voraussetzungen mit der Fahrgeschwindigkeit. In der Praxis kann anhand der Auslastung der Pickup auf die pro Kolbenstoß verdichtete Strohmasse geschlossen werden. Eine schlecht gefüllte Pickup bedeutet eine geringe, eine gut ausgelastete Pickup eine hohe pro Kolbenstoß verdichtete Strohmasse (Abbildung 4.10). Aus diesem Versuch lassen sich folglich für die Praxis zwei Voraussetzungen zur Produktion dichter Ballen ableiten: 1. Schnelle Fahrt bei geringer Drehzahl, 2. Eine voll ausgelastete Pickup.





Abbildung 4.10: Schlecht ausgelastete Pickup (1). Gut ausgelastete Pickup (2)

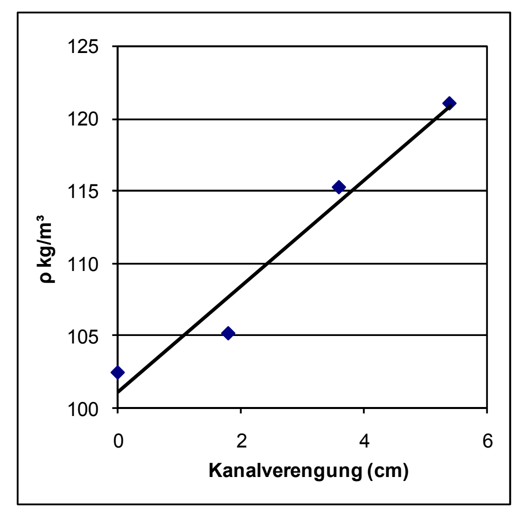


Abbildung 4.11: Ballendichte in Abhängigkeit von der Verengung des Presskanals

Zu Hypothese 3 – Dichteerhöhung durch seitliche Verengung des Presskanales: Abbildung 4.11 visualisiert die Testergebnisse zu Hypothese 3. Es ist deutlich sichtbar, dass sich die Dichte mit zunehmender Kanalverengung erhöht. Dabei beträgt die Erhöhung der Dichte im betrachteten Bereich ca. 4% je Zentimeter Kanalverengung.

Weitere Beobachtungen

Maßtoleranzen: Bei gleichen Pressbedingungen und Presseneinstellungen wurden Toleranzen in der Ballenlänge von bis zu 15,9% (bei einer Ballengruppe mit einer durchschnittlichen Dichte von 105 kg/m²) gemessen. Die Toleranzen nahmen mit steigender Dichte und Kanalverengung ab und betrugen bei einer Ballengruppe mit einer durchschnittlichen Dichte von 121 kg/m³ noch 5,4%.

Dichtetoleranzen: Bei gleichen Pressbedingungen und Presseneinstellungen wurden Dichtetoleranzen von bis zu 21% registriert. Ein Zusammenhang zwischen Toleranz und Ballendichte ist hier nicht evident.

Kantentreue und Oberflächenbeschaffenheit: Es wurde beobachtet, dass sich Kantentreue und Oberflächenbeschaffenheit mit zunehmender Dichte verbessern.

4.2.4 Leitsätze für die Baustrohballenherstellung

Ziel der Untersuchungen zur Baustrohballenherstellung war es, die Ergebnisse des Experimentes in prägnanter, verständlicher Weise als Hilfestellung für zukünftige Baustrohballenhersteller darzustellen.
Zu diesem Zweck wurden die folgenden fünf Leitsätze und die dazugehörenden Grafiken entwickelt:

1. Gleichmäßig große Schwade produzieren („Gleichmäßiger Schwad – gutes Resultat“).
2. Kurbeln zur Dichteeinstellung an der Presse fest andrehen („Kurbel fest – gut gepresst“).
3. Der Einbau einer seitlichen Kanalverengung erhöht die Ballendichte um etwa 4% pro Zentimeter („Enger Kanal – Ballen genial“).
4. Mit möglichst hoher, konstanter Geschwindigkeit bei Normdrehzahl über einen möglichst großen Schwad fahren („Schnelle Fahrt – Ballen hart“).
5. Die Pick-Up soll immer voll sein („Pick-Up voll – Ballen toll“).

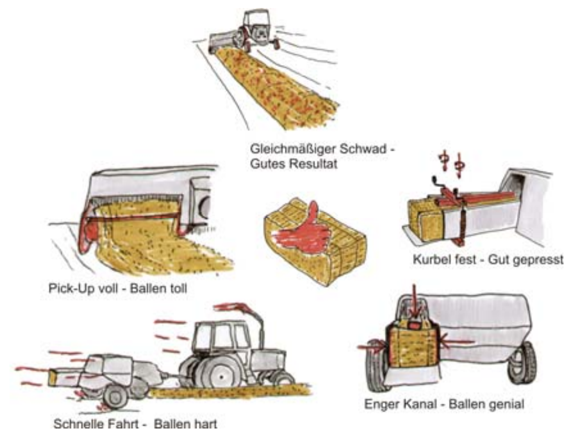


Abbildung 4.12: Faustregeln für das Herstellen dichter Ballen

4.3 Einfluss der Halmbeschaffenheit auf die Festigkeit von Strohballen

Laut Ashour (2003), King (2006), Struwe (2007) und Hansen/Warmuth (2004) hat die Strohbeschaffenheit einen Einfluss auf die Ballenfestigkeit. Dabei werden Ballen mit einem hohen Anteil langer, intakter Halme eine höhere Festigkeit beigemessen als Ballen mit hohem Anteil an Kurzstroh. Sonnenberg untersuchte in seiner Dissertation den Einfluss verschiedener Strohaufbereitungstechniken auf die Tragfähigkeit von Festmistmatratzen. Er kommt zu dem Schluss, dass die Tragfähigkeit der Festmistmatratzen umso höher ist, je längeres und unbeschädigtes Stroh eingestreut wurde (vgl. Sonnenberg 2002: 105f, 130f, 150). Diese Feststellung ist vermutlich auf Strohballen übertragbar.

4.4 Mähdrescher und ihr Einfluss auf die Balleneigenschaften

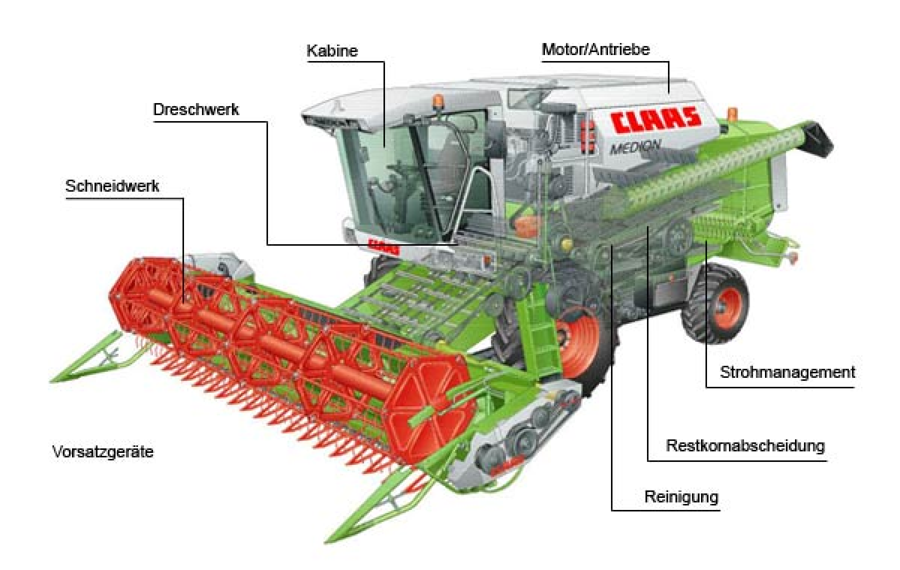


Abbildung 4.13: Baugruppen eines Mähdreschers am Beispiel des CLAAS MEDION (Claas 2006: 24f)

Für die Herstellung von Baustrohballen ist möglichst langes und in seiner Halmstruktur möglichst intaktes Stroh vorteilhaft (vgl. Kapitel 4.3). Dem Dreschvorgang wird ein wesentlicher Einfluss auf die Halmbeschaffenheit zugesprochen. Um eine Aussage zu treffen, welche Mähdrescher den Halm möglichst wenig schädigen und damit für das Dreschen von Baustroh geeignet sind, wird zunächst die Funktionsweise von Mähdreschern erläutert.

Mähdrescher bestehen aus den Baugruppen Mähwerk, Dreschwerk, Restkornabscheider, Reinigung, Korntank, Antrieb und Kabine. Abbildung 4.13 zeigt die Baugruppen eines Mähdreschers am Beispiel des CLAAS MEDION.
Das Getreide wird durch das bis zu 10 m breite Mähwerk kurz oberhalb des Bodens abgeschnitten. Dabei sorgen Ährenheber dafür, dass auch evtl. auf dem Boden liegendes Getreide erfasst wird. Die Haspel, eine sechseckige, horizontal rotierende Trommel oberhalb des Mähbalkens, drückt das stehende Getreide leicht in Richtung des Dreschers, damit lose Körner nicht vor dem Mähbalken auf den Boden fallen und verloren gehen.
Das Getreide wird nach dem Abscheiden durch eine Querförderschnecke über den Schneidwerkstisch zur Mitte des Schneidwerks befördert, gelangt von dort aus zu einer Fördereinrichtung und wird zum Dreschwerk transportiert.
Nach der Art der Führung des Strohs durch das Dreschwerk werden Tangential- und Axialmähdrescher unterschieden (vgl. Kunze 1987: 137ff., Segler 1956: 240ff.).

4.4.1 Tangentialmähdrescher

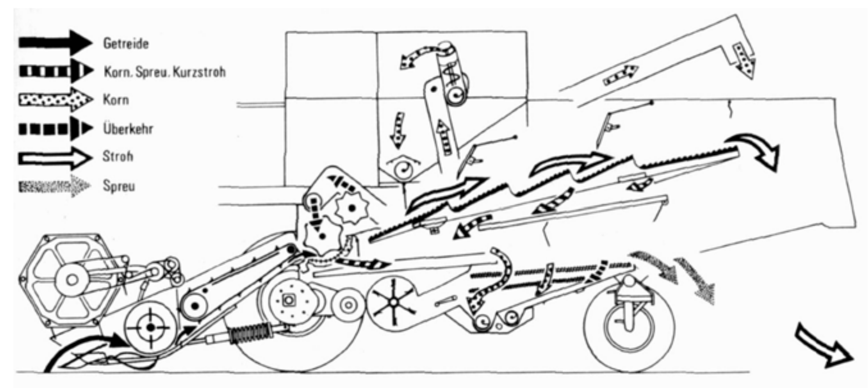


Abbildung 4.14: Mähdrescher mit Tangentialdreschwerk (Kunze 1987: 137)

Abbildung 4.14 zeigt das Funktionsprinzip eines Tangentialmähdreschers. Das Tangential- oder konventionelle Dreschwerk ist quer zur Fahrtrichtung im Mähdrescher angeordnet. Nach dem Schneiden wird das Getreide dem Dreschwerk über einen Schrägförderer zugeführt. Das Dreschwerk besteht aus der schnell rotierenden Dreschtrommel und dem feststehenden Dreschkorb. Das Getreide wird durch den sich verjüngenden Spalt zwischen Dreschtrommel und Dreschkorb geführt. Dabei schlagen die am Dreschkorb angebrachten Schlagleisten auf das Erntegut und lösen ca. 90% der Körner aus den Ähren. Der Spalt zwischen Dreschtrommel und Dreschwerk lässt sich auf das Erntegut abstimmen. Laut Untersuchungen von Büermann (1999) wird das Stroh dabei umso mehr geschädigt, je kleiner der Spalt zwischen Dreschtrommel und Dreschkorb ist. Die Körner gelangen durch den Dreschkorb zur Reinigung, die Halme werden mit dem noch nicht ausgedroschenen Getreide zum Restkornabscheider befördert.



Abbildung 4.15: Dreschwerk des CLAAS MEGA (Claas 2006a: 8)

Abbildung 4.15 zeigt das Dreschwerk des CLAAS MEGA. Hier wird das Dreschgut durch eine Beschleunigertrommel vor dem eigentlichen Ausdreschen beschleunigt, die Körner werden durch die entstehenden Zentrifugalkräfte beschleunigt und trennen sich so besser von den Ähren.
Der Reststrohabschneider ist bei konventionellen Dreschwerken in der Regel als Hordenschüttler (Abbildung 4.16) ausgebildet. Die Horden können mit flachen Treppen verglichen werden, die sich mit hoher Geschwindigkeit über ein Kurbelgetriebe auf und ab bewegen. Durch dieses Schütteln werden die restlichen Körner bzw. Ähren vom Stroh getrennt. Erstere fallen durch den Schüttler auf das Obersieb, das Stroh wird hinter dem Mähdrescher ausgeworfen bzw. zuvor optional gehäckselt.

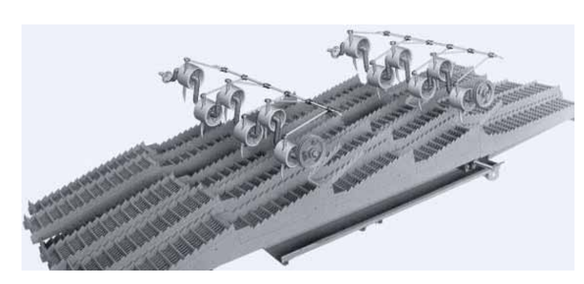


Abbildung 4.16: Hordenschüttler im CLAAS MEGA (claas.de, Zugriff am 10.07.2007)

Zusammen mit dem bereits in der Dreschtrommel abgeschiedenen Dreschgut kommen die Körner, Ähren, Spelzen und Strohhalmfragmente auf das Obersieb. Ein Luftstrom nimmt die leichten Bestandteile wie Spelzen, Halmfragmente und leeren Ähren mit sich. Die schwereren Körner fallen auf eine weitere Reinigungsstufe, das Untersieb, und werden schließlich in den Korntank befördert. Ähren, die noch Körner enthalten, daher schwerer sind und nicht vom Luftstrom mitgenommen werden, gelangen über eine Rückführung erneut zur Dreschtrommel (Abbildung 4.17) (Vgl. Kunze 1987: 137ff., Segler 1956: 240ff., Claas 2006, Claas 2006a).



Abbildung 4.17: Reinigungsstufe im CLAAS LEXION 580 (Claas 2006b: 16)

4.4.2 Axial-Mähdrescher

Der Axialmähdrescher wurde für die Bedingungen Nordamerikas entwickelt. Die Körnerbehandlung ist schonender als beim Tangentialdrescher, was ihn für den Einsatz in Mais und Körnerleguminosen prädestiniert.
Das Axialdreschwerk ist in der Regel in der Fahrtrichtung des Dreschers angeordnet (siehe Abbildung 4.18). Das Dreschgut wird längs zwischen Dresch- bzw. Trennkorb und Rotor entlang gezogen, wobei es die Rotorlängsachse mehrfach umrundet. Auf diesem im Vergleich zum Tangentialdrescher langen Weg wird das Korn nahezu vollständig vom Rest der Pflanze separiert, der Hordenschüttler kann entfallen, das ausgedroschene Stroh wird hinter der Drescheinrichtung ausgeworfen bzw. gehäckselt. Wie beim Tangentialdrescher fällt das ausgedroschene Korn sowie Ähren, Spelzen und Halmfragmente durch den Reinigungs- bzw. Trennkorb und wird über Siebe und Luftstrom gereinigt.
Aufgrund des langen Weges durch die Drescheinrichtung und der damit verbundenen mechanischen Belastungen wird der Halm sehr stark in Mitleidenschaft gezogen und in seiner Struktur weitgehend zerstört (vgl. Kunze 1987: 23ff.).

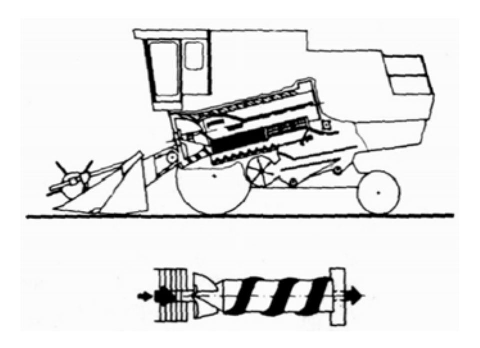


Abbildung 4.18: Mähdrescher mit Axialdreschwerk (Kunze 1987: 24)

Neben Tangential- und Axialmähdreschern sind Hybriddrescher, wie z.B. die CLAAS LEXION 570, 580 oder 600 (siehe Abbildung 4.19) am Markt, bei dem sich eine axiale Trenneinrichtung an eine tangentiale Dreschelnheit anschließt, die den Schüttler ersetzt und so die Kornverluste bei hoher Auslastung minimiert (vgl. Claas 2006b: 10f, Claas 2006c: 16f).



Abbildung 4.19: CLAAS LEXION 600 Hybriddreschwerk (Claas 2006c: 17)

4.4.3 Geeignete Mähdrescher

Für die Herstellung von Baustrohballen ist möglichst langes und in seiner Halmstruktur möglichst intaktes Stroh vorteilhaft (vgl. Kapitel 4.3). Aus diesem Grund sind Tangenitalmähdräscher, möglichst ohne nachgeschaltete Abscheidetrommeln, Axialmähdreschern oder Mähdräschern mit Hybriddreschwerk vorzuziehen. Tabelle 4.3 listet Beispiele für marktgängige Mähdrescher mit Tangentialdreschwerk auf.

Marke	Modellreihe (Quelle)
CLAAS	DOMINATOR, MEDION, MEGA, LEXION 560-510 (claas.de, Zugriff am 10.07.2007)
Deutz-Fahr	Serien 54 und 56 (deutz-fahr.de, Zugriff am 10.07.2007)
Fendt	Baureihen C, E und 600 (fendt.com, Zugriff am 10.07.2007)
John Deere	iWTS, CWS (john-deere.com, Zugriff am 10.07.2007)
Massey Ferguson	ACTIVA (MF 7244-7246), BETA (MF 7260, 7270) CERA (MF 7274, 7278) (massey-ferguson.com, Zugriff am 10.07.2007)
New-Holland	Serien CS, TC, CX, CSX (newholland.com, Zugriff am 10.07.2007)

Tabelle 4.3: Beispiele für Tangentialmähdrescher

5 Zum Primärenergieinhalt von Strohballen

5.1 Grundlagen

Für die Produktion jedes Baustoffes wird Energie benötigt. Dabei gilt: Je weniger hoch verarbeitet ein Baustoff ist, umso weniger Energie wurde zu seiner Herstellung eingesetzt. So enthalten naturnahe Baustoffe wie Lehm, Feldsteine oder Holz deutlich weniger Herstellungsenergie als industriell verarbeitete Baustoffe wie Metalle, Kunststoffe oder Zement. Die zur Herstellung eines Baustoffes benötigte Energie wird als **Primärenergieinhalt** (PEI) bezeichnet und unter anderem zur Beschreibung der Umweltverträglichkeit von Baustoffen eingesetzt.

Der Primärenergieinhalt PEI (nicht erneuerbar) bezieht sich nach Kohler/Klingele (Hrsg.) (1995), zitiert in Waltjen (1999: 11) *„auf alle Vor- und Herstellungsprozesse bis zum auslieferungsfertigen Produkt. Das Kriterium berücksichtigt nur Energie aus nicht erneuerbaren Quellen. Energieinhalte von Holz, Holzschnitzeln, Wasser, Sonne etc. sind daher nicht miterfasst. […] Zur Klassifizierung wird der obere Heizwert einer Ressource verwendet“.*
Der PEI beschreibt also die Menge an nicht erneuerbarer Energie die benötigt wird, um ein (Bau-) Produkt herzustellen. Unberücksichtigt bleibt hier der Energieaufwand für den Transport der Baustoffe zur Baustelle und für den Einbau.

Die Prozesse, die zur Herstellung des Produktes notwendig sind, werden Prozesse erster Ordnung genannt. Die Prozesse, die zur Herstellung von Hilfsmitteln, welche zur Herstellung der Produkte benötigt werden, sind Prozesse zweiter Ordnung.

5.2 Zum Stand der Forschung

Es konnten nur zwei Quellen von PEI-Untersuchungen der Strohballenproduktion recherchiert werden. Diese gehen zudem von unterschiedlichen Ansätzen aus.

Richard Hoffmeister
Auf zahlreichen Internetseiten (z.B. Fachverband für Strohballenbau, www.fasba.de, Zugriff am 14.06.2007) werden Untersuchungen von Richard Hoffmeister zum Primärenergieinhalt von Strohballen genannt, die dieser an der Frank Lloyd Wright School of Architecture Scotsdale/Arizona durchführte.
Hoffmeister berechnete den Primärenergieinhalt von Strohballen mit 115 MJ/Mg [32 kWh/Mg, Anm. d. Vf.].
Weitere Informationen waren nicht auffindbar.

Mark Bigland-Pritchard, Adrian Pitts 2006
Basierend auf der Doktorarbeit von Bigland-Pritchard wurde 2006 der Artikel “Evaluation of Strawbale Building: Benefits and Risks” in Architectural Science Revue, Vol. 49 Nr. 4 publiziert.
Die Autoren gehen davon aus, dass das Stroh auch gepresst würde, ohne Verwendung im Strohballenbau zu finden und veranschlagen lediglich einen Energieaufwand für den Transport der Ballen vom Feld zur Baustelle.
Wird das Stroh auf der Baustelle umgepresst, so entsteht für 400 Ballen (die Menge, die laut der Autoren für ein 150 m² Haus benötigt wird) ein Energieaufwand von 0,34 GJ. Wird von einer Ballendichte von 100 kg/m³ und Ballenabmessungen von 0,36x0,48x1,0 m ausgegangen, so errechnet sich für die 400 Ballen eine Masse von ca. 6,2 Mg, entsprechend einem Primärenergieaufwand von ca. 15,2 kWh/Mg für das Pressen.

Es kann festgehalten werden, dass der Primärenergieinhalt von Strohballen in nicht ausreichender Weise wissenschaftlich untersucht wurde. Die vorliegende Dissertation leistet an dieser Stelle einen Beitrag.

5.3 Ermittlung des Primärenergieinhaltes von Strohballen

5.3.1 Annahmen und Umfang der Untersuchungen

Strohballen als Nebenprodukt der Getreideerzeugung
Wird Stroh als Nebenprodukt bei der Erzeugung von Getreide definiert, müssen in die Berechnungen zum Primärenergieinhalt eingehen:

- Das Aufsammeln des Strohs und das Pressen der Ballen
  - mit dem Treibstoffbedarf für die dafür benötigten Maschinen,
  - dem Primärenergiebedarf für die verwendeten Hilfsstoffe (Ballengarn),
  - dem anteiligen Primärenergieaufwand für die Herstellung der eingesetzten Maschinen.
- Das Laden und Umladen sowie der Transport der Ballen zum Herstellungswerk
  - mit dem Treibstoffbedarf für die dafür benötigten Maschinen
  - dem anteiligen Primärenergieaufwand für die Herstellung der eingesetzten Maschinen.

In diesem Fall ist der Primärenergieinhalt im Vergleich mit anderen Baustoffen sehr niedrig, da die zur Kultivierung des Getreides notwendigen Prozessschritte der Produktion des Getreides zugerechnet werden.

Wird Getreide des Strohes wegen angebaut, gilt also das Korn als Nebenprodukt, wären auch die Bewirtschaftung der Ackerflächen und der Energieaufwand für die Herstellung und Ausbringung von Dünge- und Spritzmitteln sowie der anteilige Herstellungsenergieaufwand für die zur Bewirtschaftung nötigen Maschinen in die Berechnungen einzubeziehen. Unter diesen Voraussetzungen liegt der Primärenergieinhalt von Strohballen deutlich höher.

Im Folgenden wird (abgesehen von einem Testszenario zur Klärung der Unterschiede zwischen den Betrachtungsweisen) von **Stroh als Nebenprodukt** ausgegangen.

Primärenergiebedarf Maschinenherstellung = Maschinengewicht * PEI Stahl
Zur Abschätzung der anteiligen für die Herstellung der Maschinen aufgewendeten Primärenergie (Prozesse 2. Ordnung), wird im Rahmen dieser Arbeit angenommen, die Maschinen bestünden zur Gänze aus Stahl. Das Maschinengewicht wurde mit dem PEI von Stahl multipliziert und anteilig der Nutzungsdauer der Maschinen dem PEI von Strohballen zugeschlagen. Zur Nutzungsdauer wurden die Daten aus KTBL 2004 herangezogen.

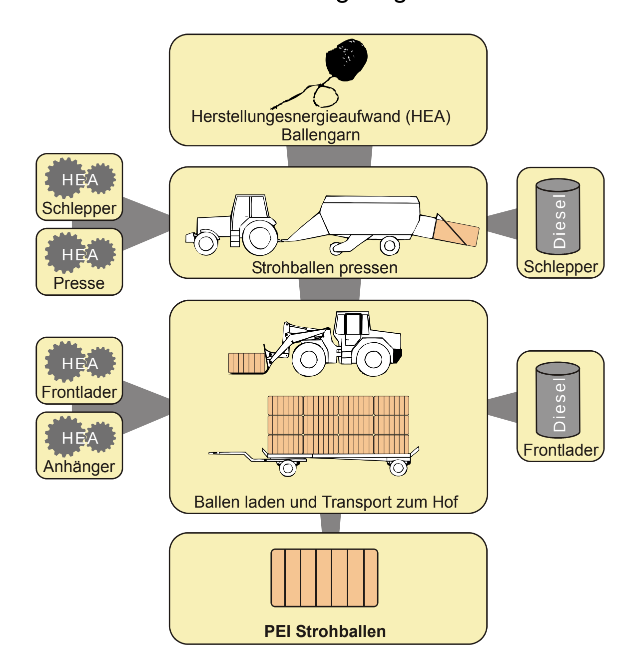


Abbildung 5.1: Prozesskette für den PEI zur Produktion von Quaderballen

Landwirtschaftlicher Betrieb = Herstellerwerk
Für die Berechnungen wurde davon ausgegangen, dass der Bauernhof das „Herstellungswerk“ für den Baustoff Strohballen ist.
Als „auslieferungsfertig“ gilt der Strohballen, wenn er auf dem Hof gelagert ist.
Daraus ergibt sich die in Abbildung 5.1 dargestellte Prozesskette für den Herstellungsenergieaufwand von Quaderballen.

5.3.2 Einflussfaktoren

Bei der Berechnung des Primärenergieinhaltes wird grundsätzlich zwischen der Herstellung von Hochdruck Kleinballen (HD-Ballen und Quaderballen (Q-Ballen) unterschieden. Die unterschiedlichen Strohballenarten werden in Kapitel 4, *Zur Herstellung von Strohballen*, ausführlich erläutert.

Bei der Herstellung der Strohballen wurden folgende Einflussfaktoren berücksichtigt:

- Die Größe des Schlages (Feldes): Je größer der Schlag umso effizienter seine Bewirtschaftung.
- Die Mähbalkenbreite des Mähdreschers: Je breiter der Mähbalken umso größer der Abstand zwischen den Strohschwaden, umso geringer die Anzahl der Fahrten über das Feld.
- Die auf dem Feld befindliche Strohmenge: Je höher die auf dem Feld befindliche

Strohmenge umso effizienter die Herstellung.

- Die Entfernung vom Feld zum Hof: Je geringer die Entfernung zum Hof (Herstellerwerk), umso geringer der Transportenergieaufwand, umso effizienter die Herstellung.

5.3.3 Methode

Ziel ist die Gewinnung von Rechenwerten für den Primärenergieinhalt von HD-Ballen und Q-Ballen. Dazu wurden unter Veränderung der Einflussfaktoren für HD- und Quaderballen jeweils zwei Szenarien („günstig“ und „ungünstig“) gebildet. Der Mittelwert aus diesen Szenarien wird als Rechenwert für den PEI von HD- bzw. Q-Ballen angenommen.
Zusätzlich wurde ein Szenario, bei dem Stroh das Hauptprodukt und das Korn das Nebenprodukt darstellt, betrachtet. Bei allen Szenarien wurde ein ebener, mittelschwerer Boden angenommen. Zwischen einzelnen Stroharten wurde nicht unterschieden.
Tabelle 5.1 zeigt die Eingangsgrößen der unterschiedlichen Szenarien.

Tabelle 5.1: Eingangsgrößen der unterschiedlichen Szenarien

Spezifikationen	**HD-Ballen**		**Q-Ballen**		
	Szenario 1 ungünstig	**Szenario 2 günstig**	**Szenario 3 ungünstig**	**Szenario 4 günstig**	**Szenario 5 Stroh Hauptprodukt**[2]
Ballenabmessungen h x l x b (m)	0,36x0,24x0,75		0,7x1,2x2,2		
Ballenmasse m (kg)	13		255		
Ballendichte ρ (kg/m³)	100[1]		138		
Schlaggröße A (ha)	2	20	2	20	
Schwadabstand (m)	2,75	4,15	5,6	8	
Strohmasse (Mg/ha)	4	5	4	5	
Aufladen der Ballen	per Ballenschurre		Frontlader		
Einfache Transportentf. zum Hof (km)	4	1	4	1	
Abladen der Ballen	per Hand		Frontlader		

[1]: KTBL 2004:569;
[2]: Stroh aus ökologischem Anbau, inkl. Getreidekultivierung jedoch ohne Prozesse 2. Ordnung bei der Getreidekultivierung.

5.3.4 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Berechnungen für die einzelnen Szenarien sind dargestellt in Tabelle 5.2 und Abbildung 5.2 (Berechnungen und Details siehe Anhang I.4 *Ermittlung des Primärenergieinhaltes von Strohballen*).

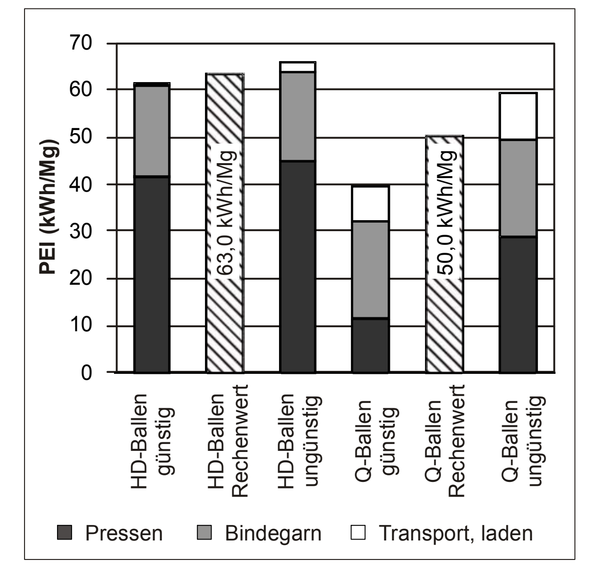


Abbildung 5.2: Primärenergieinhalt PEI von Strohballen - unterschiedliche Szenarien. Der Rechenwert entspricht jeweils dem arithmetischen Mittel aus günstigem und ungünstigem Szenario

Auffällig sind die Unterschiede im Anteil der für das Pressen der Ballen benötigten Energie. Quaderballenpressen arbeiten effizienter als HD-Ballenpressen.
Während die für den Transport eingesetzte Energie bei den HD-Ballen marginal ist, macht sie bei den Quaderballen, bedingt durch den Maschineneinsatz beim Be- und Entladen des Transportfahrzeuges, bis zu 16% des PEI aus.
Die Quaderballen benötigen für die Bindung zwar weniger Garn in Metern, jedoch hat das Garn für Großballen ein höheres Metergewicht, da hier höhere Anforderungen an die Reißfestigkeit gestellt werden. Der auf das Garn entfallende Energieaufwand ist daher in allen Varianten nahezu gleich.
Der auf die Herstellung der Maschinen entfallende Anteil am Primärenergiebedarf liegt zwischen 3,4% im Szenario Q-Ballen ungünstig und 7,0% im Szenario HD-Ballen günstig.

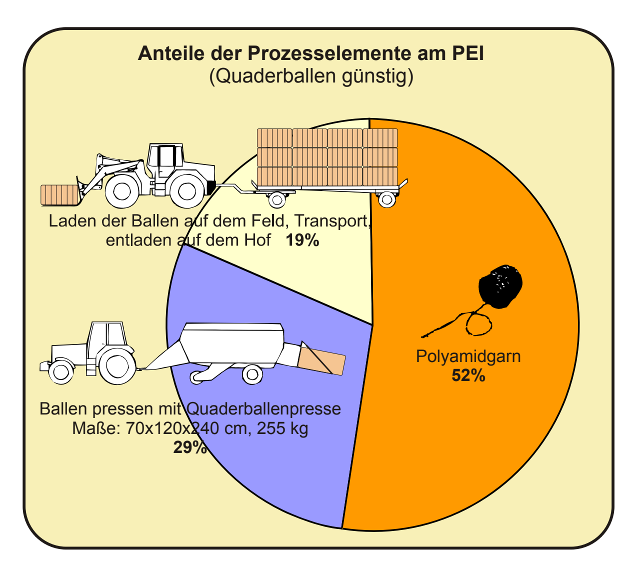


Abbildung 5.3: Anteile der Prozesselemente am PEI bei Quaderballen im Szenario 4

Trotz des Maschineneinsatzes haben Quaderballen im betrachteten Massebezug aufgrund der höheren Effizienz der Presse einen deutlich niedrigeren Primärenergieinhalt als HD-Ballen. Wird jedoch die höhere Dichte von Quaderballen berücksichtigt, gleichen sich die Primärenergieinhalte von Quader- und HD-Ballen im Volumenbezug an.
Abbildung 5.3 zeigt die Anteile der Prozesselemente am PEI bei Quaderballen im Szenario 4. Dieses Szenario stellt die Ballenproduktion unter optimalen Bedingungen dar.

Auffällig ist der hohe Anteil des Bindegarns am Primärenergieinhalt. Zur Senkung des Primärenergieinhaltes scheint es lohnend, Alternativen zum verwendeten Bindegarn zu untersuchen.

Als Rechenwerte für den PEI von Strohballen werden vorgeschlagen:

PEI Quaderballen: 50 kWh/Mg (180 MJ/Mg)
PEI HD-Ballen: 63 kWh/Mg (227 MJ/Mg)

Tabelle 5.2: PEI von Strohballen - unterschiedliche Szenarien

	HD-Ballen				Quaderballen					
	günstig Szenario 2		ungünstig Szenario 1		günstig Szenario 4		ungünstig Szenario 3		Hauptprodukt Szenario 5	
	kWh/ Mg	%	kWh/ Mg	%	kWh/ Mg	%	kWh/ Mg	%	kWh/ Mg	%
Ballen Pressen	41,5	68	44,5	68	11,4	29	28,6	48	11,4	3
Bindegarn	19,3	31	19,3	29	20,6	52	20,6	35	20,6	6
Transport zum Hof, (Laden und Entladen)	0,5	1	2,0	3	7,5	19	10,0	17	7,5	2
Prozessschritte zur Getreidekultivierung									302,3	88
Summe	61,3	100	65,8	100	39,5	100	59,1	100	341,5	100

5.4 *Vergleich der Ergebnisse mit früheren Untersuchungen und anderen Baustoffen*

5.4.1 Vergleichbarkeit mit früheren Untersuchungen

Hoffmeister gibt einen PEI von 32 kWh/Mg an. In dieser Arbeit wurden Primärenergieinhalte von 63 kWh/Mg bei HD- und 50 kWh/Mg bei Quaderballen errechnet.
Wie in 5.2 dargestellt, sind die Rahmenbedingungen bei Hoffmeister unklar, daher können die Werte nicht sinnvoll verglichen werden.
Bigland-Pritchard/Pitts (2006) geben den Primäraufwand für das (Um-)Pressen von Strohballen mit 0,34 GJ für 400 HD-Ballen an, was einem Aufwand von 15,2 kWh/Mg entsprechen würde.
Auf der Berechnungsgrundlage dieser Dissertation ergibt sich für das reine Pressen der Ballen (Szenario HD-Ballen günstig) mit 37,4 kWh/m³ ein PEI, der mehr als doppelt so hoch ist wie der bei Bigland-Pritchard (2006) angegebene. Dies lässt sich erklären durch:

1. Bigland-Pritchard berücksichtigte den Herstellungsenergieaufwand für die Maschinen nicht.
2. Bei Bigland-Pritchard wurde stationär gepresst, es wurde keine Energie zum Bewegen der Presse über das Feld eingesetzt.
3. Es wurden bereits gepresste Ballen geöffnet und wieder verdichtet. Das Stroh war also schon vorverdichtet und musste nur noch nachverdichtet werden.

5.4.2 Vergleich mit anderen Baustoffen

Abbildung 5.4 verdeutlicht den minimalen Primärenergieinhalt von Strohballen im Vergleich zu anderen Baustoffen. Eingesetzt als Dämmstoff benötigen Strohballen im Massebezug nur ein Hundertstel der Primärenergie von Mineralwolle und ein Fünfhundertstel der Primärenergie von Polystyrol.
Verwendet als tragender Baustoff liegen die Ballen bei einem Vierzehntel von Hochlochziegeln und einem Zwanzigstel von Porenbeton.

Da Strohballen im Vergleich zu anderen Dämmstoffen eine hohe Dichte aufweisen, gleichen sich die Primärenergieinhalte im Volumenbezug an die konventionellen Baustoffe an. Verwendet als tragendes Element haben Strohballen im Vergleich zu anderen tragenden Baustoffen eine geringe Dichte. Entsprechend vergrößert sich der Unterschied der Primärenergieinhalte im Volumenbezug.

Wird der Primärenergieinhalt auf den Wärmedurchlasswiderstand bezogen, so schneiden die Strohballen im Vergleich nochmals deutlich besser ab. Gewählt wurde ein Wärmedurchlasswiderstand von R = 7 m²K/W, der etwa dem Passivhausstandard entspricht. Der Wärmedurchlasswiderstand wird bei einem 36 cm dicken Strohballen, bei welchem der Wärmestrom senkrecht zur Faser verläuft, erreicht. Die Werte für Leichtlehm, Kalksandstein und Beton sind nicht praxisrelevant sondern rein informativ. Bei dem gewählten R-Wert wäre die Leichtlehmwand 1,75 m, die Kalksandsteinwand 6,93 m und die Betonwand 14,7 m dick.

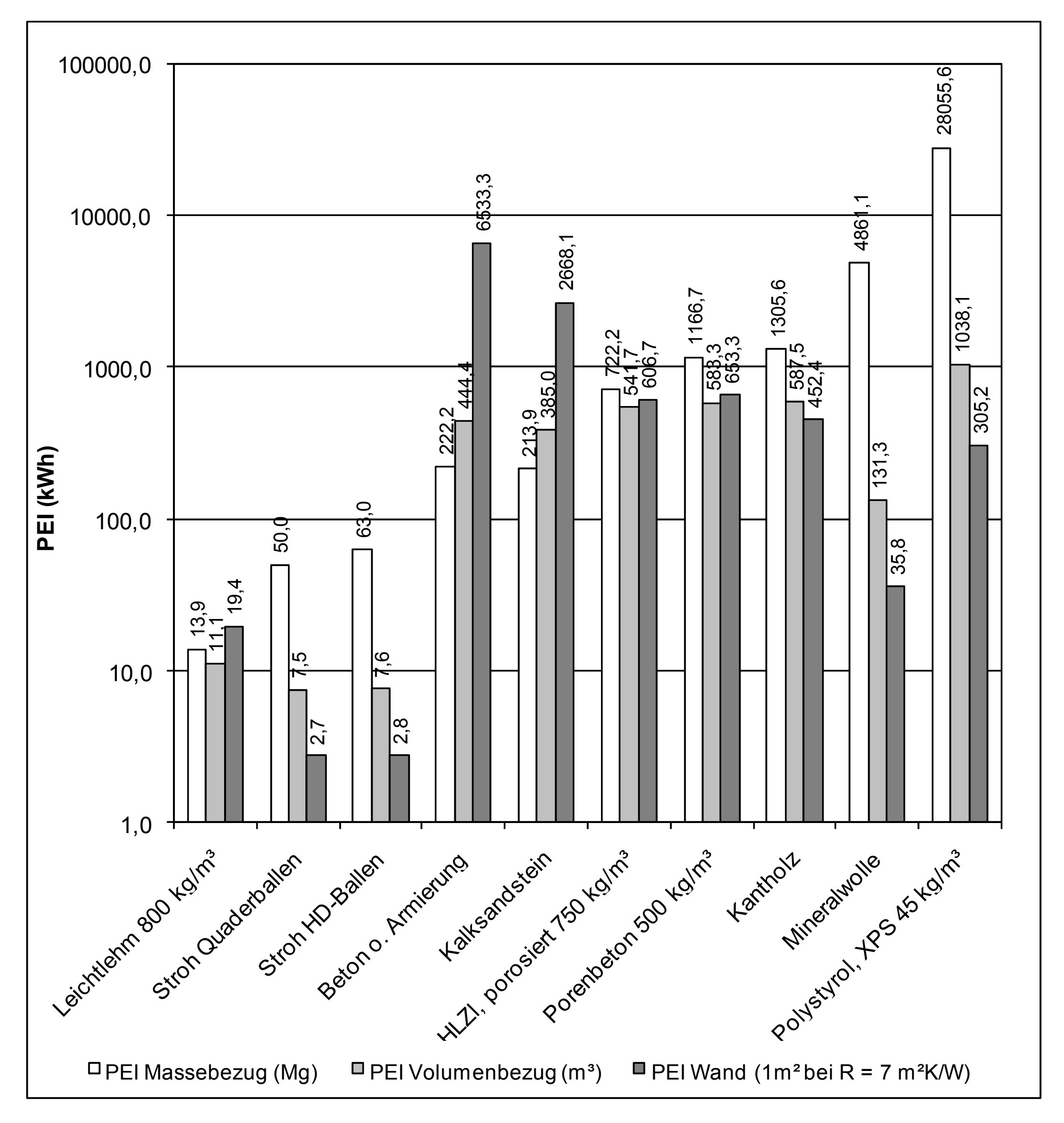


Abbildung 5.4: PEI verschiedener Baustoffe. Logarithmische Skala. (Daten aus Waltjen 1999, außer Stroh: Eigene Berechnungen und Kalksandstein: Brinkmann 2004, Brechner 2006)

6 Zur Wärmeleitfähigkeit von Strohballen und Wänden aus Strohballen

6.1 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die zum weiteren Verständnis notwendigen thermodynamischen Grundlagen erläutert, Messungen zur Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität von Strohproben, Ballen und Wandkonstruktionen zusammenfassend dargestellt und diskutiert.

Thermische Energie ist die Energie, die in der ungeordneten Bewegung der Atome/Moleküle eines Stoffes gespeichert ist. Sie wird in der Einheit Joule (J) angegeben, sinkt mit abnehmender Temperatur und ist bei -273,15 °C oder 0 K, dem absoluten Nullpunkt, gleich Null.

Wärme ist der Transport thermischer Energie von einem Medium auf höherem zu einem Medium auf niedrigerem Energie-Niveau. Dabei wirkt das Temperaturgefälle als treibendes Potenzial für den Wärmefluss.

Die Begriffe „Wärme“ und „thermische Energie“ werden umgangssprachlich gleichgesetzt.

Der Transport von Wärmeenergie durch die Strömung fluider Medien wird als **Konvektion** bezeichnet. Dabei wird laut Kuchling (2001: 311) zwischen erzwungener und freier Konvektion unterschieden. Während die erzwungene Konvektion z.B. durch Pumpen oder Gebläse angetrieben wird, findet die freie Konvektion über den Dichteunterschied von Fluiden aufgrund ihrer Temperaturdifferenzen statt.

Der Transport von Wärmeenergie durch Wärmeleitung wird als **Transmission** bezeichnet.

Die **Wärmeleitfähigkeit λ** (W/(mK)) gibt an, welche Leistung (W) durch einen Stoff von einem Meter Dicke bei einer Temperaturdifferenz von 1 K übertragen wird. Der primäre Einflussfaktor für die Wärmeleitfähigkeit eines Stoffes, so Willems/Schild/Dinter (2006: 2.3), ist seine Dichte ρ. Dabei steigt mit steigender Dichte die Wärmeleitfähigkeit. Willems/Schild/Dinter (2006: 2.3) folgend kann freie Konvektion bei sehr geringen Dichten einen Beitrag zum Wärmetransport durch ein Bauteil leisten, welcher makroskopisch betrachtet eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit innerhalb des Bauteils bewirkt. Dieser Effekt tritt besonders bei offenzelligen und faserigen Dämmstoffen auf und konnte bei Stroh nachgewiesen werden, siehe 6.2.4.

Wärmestrahlung ist der Transport thermischer Energie mittels elektromagnetischer Wellen. Dabei stehen Körper, welche mit anderen Körpern durch transluzente Medien oder ein Vakuum getrennt sind, im Strahlungsaustausch.
Derjenige Körper, der die kurzwelligere Strahlung abgibt, also ein höheres Temperaturniveau hat, emittiert thermische Energie. Jener Körper, welcher die langwelligere Strahlung abgibt, also ein niedrigeres Temperaturniveau hat, absorbiert thermische Energie.
Dabei wird die auftreffende Strahlung teilweise reflektiert, evtl. teilweise durchgeleitet (bei transluzenten Körpern) und nur teilweise absorbiert. Die Summe aus Absorption, Reflexion und Transmission ist gleich der übertragenen Strahlungsenergie.

Der Wärmetausch zwischen zwei Medien, die über eine Grenzfläche miteinander in Kontakt stehen, wird als Wärmeübergang bezeichnet und durch den **Wärmeübergangswiderstand** R_S oder den **Wärmeübergangkoeffizienten**

$$h = \frac{1}{R_S}$$

beschrieben. h beschreibt nach Willems/Schild/Dinter (2006: 2.7) die Wärmemenge Q, die in 1 s pro Quadratmeter Grenzfläche und pro Kelvin Temperaturdifferenz ausgetauscht wird.
Folgend wird der Wärmeübergang zwischen Luft und Wand betrachtet.
Da die Wärmeleitfähigkeit (Transmission) der Luft in diesem Zusammenhang vernachlässigt werden kann, setzt sich der Wärmeübergangswiderstand h im Wesentlichen aus dem Strahlungsanteil h_r und Konvektionsanteil h_c zusammen:

$$h = h_r + h_c$$

Bei einer Wand ist der Übergangswiderstand an der Innenseite der Wand R_{Si} und der Übergangswiderstand an der Außenseite der Wand R_{Se}.

Der **Wärmedurchlasswiderstand R** (einer Bauteilschicht) ist der Quotient aus der (Schicht-) Dicke d und der Wärmeleitfähigkeit λ:

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

Der **Wärmedurchgangswiderstand R_T** beschreibt den Gesamtwiderstand einer Konstruktion mit allen Schichten und Übergangswiderständen eines Bauteils:

$$R_T = R_{Si} + R + R_{Se}$$

Der **Wärmedurchgangskoeffizient U** (für opake Bauteile) ist der Kehrwert des Wärmedurchgangswiderstandes:

$$U = \frac{1}{R_T}$$

Je kleiner der U-Wert, umso besser dämmt ein Bauteil, je größer der U-Wert, umso höher der Energietransport.

6.2 Überlegungen zur Wärmeleitfähigkeit von Strohballen und Strohballenwänden

Folgend werden Testergebnisse von Messungen zur Wärmeleitfähigkeit aus den USA, Kanada, Österreich und Deutschland getrennt nach Wärmestrom zur Halmlage und Testobjekt aufgeführt und diskutiert. Eine detailliertere Betrachtung kann Anhang I.5, *Zum Stand der Forschung zur Wärmeleitfähigkeit von Stroh*, entnommen werden.

6.2.1 Wärmeleitfähigkeit von Strohproben und -ballen, Wärmestrom parallel zur Faser

Die Wärmeleitfähigkeiten von Strohproben und -ballen mit Wärmestrom parallel zur Faser werden in Tabelle 6.1 dargestellt.
Ein direkter Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten ist allerdings aufgrund der unterschiedlichen, teilweise unbekannten Testbedingungen problematisch. Es kann jedoch festgestellt werden, dass bei ähnlichen Testtemperaturen und Dichten ähnliche Werte erzielt werden. Der Wert aus der Allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (AbZ) liegt im oberen Bereich des Feldes und ist somit gut und sicher gewählt.

6.2.2 Wärmeleitfähigkeit von Strohproben und -ballen, Wärmestrom senkrecht zur Faser

Die Wärmeleitfähigkeiten von Strohproben und –ballen mit Wärmestrom senkrecht zur Faser werden in Tabelle 6.2 dargestellt. Auch bei den hochkant liegenden Ballen ist ein direkter Vergleich schwierig. Die Streuung der Messwerte ist hier deutlich geringer als bei flach liegenden Ballen. Auffällig ist, dass alle Werte für die Wärmeleitfähigkeit der hochkant liegenden Ballen deutlich niedriger liegen als jene der flach liegenden. Der höchste Wert für die Wärmeleitfähigkeit ist der Maximalwert für Baustrohballen. Dieser liegt also in einem Bereich, der den bei Naturdämmstoffen üblichen Toleranzen entgegenkommt.

6.2.3 Wärmeleitfähigkeit von Strohballenwänden

Die Wärmeleitfähigkeiten von Wänden aus Strohballen werden in Tabelle 6.3 dargestellt. Wie bei den Einzelballen bestätigt sich, dass bei den senkrecht orientierten Wänden niedrigere Leitwerte gemessen wurden als bei den horizontal orientierten. Es ist ersichtlich, dass die Leitwerte der Wände höher liegen als jene der Ballen.

Tabelle 6.1: Testergebnisse Proben und Ballen, Wärmestrom parallel zur Faser

Proben und Ballen	Orientierung	Strohart	Dichte ρ (kg/m³)	Temperatur [1, 2, 3]	W-leitfähigkeit (W/(mK)) [4]
McCabe 1		Reis+Weizen	133	9,7[2]	0,061
Acton 1994		Weizen	76-87	k.A.	0,059-0,05
Ashour 1		Weizen	82	10,3[3]	0,039
Ashour 2		Weizen	82	34,2[3]	0,118
Ashour 3		Weizen	138	10,3[3]	0,031
Ashour 4		Weizen	138	34,2[3]	0,086
Ashour 5		Gerste	69	9,6[3]	0,045
Ashour 6		Gerste	69	34,2[3]	0,094
Ashour 7		Gerste	98	9,6[3]	0,030
Ashour 8		Gerste	98	34,2[3]	0,073
Baustroh 2		k.A.	90-110	10,0[1]	0,080

[1]: Mittlere Temperatur im Ballen (°C); [2]: Temperaturdifferenz (K); [3]: Unbekannt (°C); [4]: gemessene Werte

Tabelle 6.2: Testergebnisse Proben und Ballen, Wärmestrom senkrecht zur Faser

Proben und Ballen	Orientierung	Strohart	Dichte ρ (kg/m^3)	Temperatur [1, 2, 3]	W-Leitfähigkeit λ (W/(mK)) [4]
McCabe 2		Reis+Weizen	133	19,2[2]	0,0490
McCabe 3		Reis+Weizen	133	10,9[2]	0,0460
Wimmer et. al 1		Weizen	73	10,6-11,1[2]	0,0369
Wimmer et. al 2		Weizen	83,3	10,6-11,1[2]	0,0337
Wimmer et. al 3		Weizen	100,8	10[1]	0,0380
Wimmer et. al 4		Weizen	100,8	19,5[1]	0,0394
Wimmer et. al 5		Weizen	100,8	28,7[1]	0,0408
FASBA 1		k.A.	90	10,6[1]	0,0380
FASBA 2		k.A.	90	23,5[1]	0,0401
FASBA 3		k.A.	90-110	39,8[1]	0,0419
Baustroh 2		k.A.	90-110	10[1]	0,0520

[1]: Mittlere Temperatur im Ballen (°C); [2]: Temperaturdifferenz (K); [3]: Unbekannt; [4]: gemessene Werte

Tabelle 6.3: Testergebnisse Wände

Verputzte Wände	Orientierung	Strohart	Dichte ρ (kg/m^3)	Temperatur [1]	W-Leitfähigkeit λ (W/(mK)) [2]
Watts 1995		k.A.	k.A.	k.A.	0,094
Stone 1		k.A.	k.A.	k.A.	0,128
ORNL 1998		Weizen	k.A.	k.A.	0,100
Stone 2		k.A.	k.A.	k.A.	0,070
FASBA 2006		k.A.	98,8	18,2	0,072

[1]: Temperaturdifferenz (K); [2]: gemessene Werte

6.2.4 Diskussion der beobachteten Effekte

1. **Bei einem Wärmestrom parallel zur Faser ist die Wärmeleitfähigkeit höher als bei einem Wärmestrom senkrecht zur Faser.**
   Ausgehend von einem Strohballen als Objekt aus regelmäßig über- bzw. nebeneinander geschichteten Rohren (Abbildung 6.1) ist es leicht vorstellbar, dass der Wärmedurchgangswiderstand flach liegender Strohballen (liegende „Rohre) niedriger ist, als der hochkant liegender Strohballen (stehende Rohre). Im liegenden Strohballen stehen die warme und die kalte Seite des Ballens in direkterem Strahlungsaustausch, die Wärmeleitung über Stroh und Luft ist höher und Konvektionsströme können sich innerhalb und zwischen den Halmen besser ausbilden.

2. **Mit steigender Ballendichte nimmt die Wärmeleitfähigkeit λ zunächst ab, stagniert und steigt schließlich.**

Der Wärmetransport durch den Ballen setzt sich aus Transmissions-, Konvektions- und Strahlungsanteil zusammen. Dabei erfolgt die Wärmeleitung überwiegend durch den Mantel des Halms, Strahlung und Konvektion durch die Luft zwischen den und innerhalb der Halme.
Mit der Änderung der Ballendichte ändert sich sowohl der Anteil der Übertragungsarten am Wärmetransport als auch deren Summe.

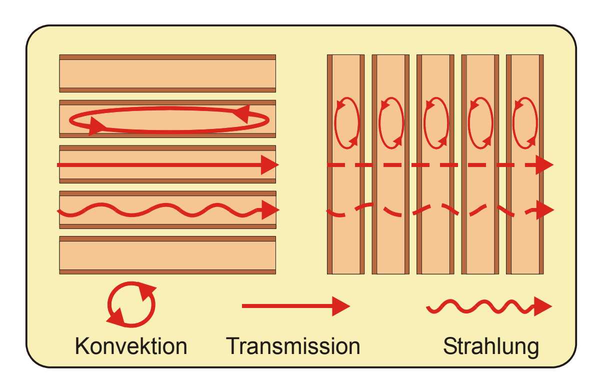


Abbildung 6.1: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Halmorientierung

Bei dem Gedankenmodell eines Ballens mit nur vereinzelten Halmen, wäre der Konvektionsanteil sehr hoch. Die thermische Energie würde über die Luft „barrierefrei“ durch den Ballen transportiert. Gleiches gilt für die Wärmestrahlung. Mit Erhöhung des Halmanteils wird die Konvektion gebremst, ohne dass die Wärmeleitung über die Halme in gleichem Maße steigt.
Das andere Extrem ist ein sehr dichter Ballen, der kaum noch Lufteinschlüsse aufweist. Nun ist der Konvektionsanteil gering, während eine hohe Wärmeleitung vorliegt.
Zwischen diesen Extremen gibt es ein Optimum, in dem die Halme die Konvektion behindern, ohne jedoch zu viel Wärme hindurch zu leiten. Dieses Optimum lag bei den Untersuchungen von Ashour bei Weizenballen unabhängig von der Temperatur zwischen ρ= 110 und 130 kg/m³ (siehe hierzu Abbildung 6.2).

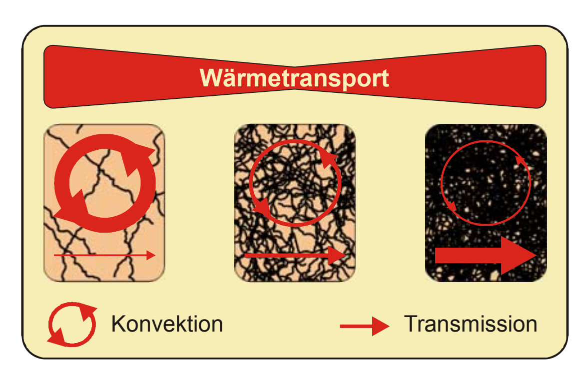


Abbildung 6.2: Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Dichte

3. **Mit zunehmender Temperatur erhöht sich die Wärmeleitfähigkeit der Proben**
Laut VDI (2006) steigt die Wärmeleitfähigkeit von Luft bei zunehmender Temperatur. Da Strohballen zu einem großen Teil aus Luft bestehen, erhöht sich auch die Wärmeleitfähigkeit des Ballens bei steigender Temperatur. Zusätzlich können sich bei höherer Temperatur stärkere Konvektionsströmungen ausbilden.

4. **Die Temperaturabhängigkeit sinkt mit-zunehmender Ballendichte**
Wie unter Punkt 3 dargestellt, sind Konvektion und Änderung der Wärmeleitfähigkeit von Luft ursächlich für die Temperaturabhängigkeit des Wärmetransportes durch den Ballen. Mit zunehmender Ballendichte sinkt der Anteil der Luft am Ballenvolumen und die Konvektion wird zunehmend behindert. Daraus folgt eine Abnahme der Temperaturabhängigkeit mit zunehmender Ballendichte.

5. **Die Wärmeleitfähigkeit von Wänden ist höher als jener von Einzelballen oder Proben**
Einzelballen und Wände wurden mit unterschiedlichen Verfahren getestet (Proben/Ballen mit Sonden- bzw. Plattengeräten, Wände durchgängig mit Heizkastenverfahren). Es ist möglich, dass die Differenzen aufgrund der Unterschiedlichkeit dieser Verfahren zustande kommen.
Der Einfluss des Putzes ist zudem als sicher anzusehen. Putze weisen eine deutlich höhere Wärmeleitfähigkeit auf als Wärmedämmstoffe. Die Wärmeleitfähigkeit wurde jeweils über die gesamte Wand gemessen. So kann die beobachtete höhere (mittlere) Wärmeleitfähigkeit als Folge dieser Effekte angesehen werden.

6. **Es konnte keine Aussage zum Einfluss der Strohart auf den Wärmeleitwert getroffen werden.**
Da die Strohart nur bei wenigen Tests angegeben wurde, sind sowohl Diversität als auch Datenbasis sehr schmal. Ashour (2003) (siehe Anhang I.5, *Zum Stand der Forschung zur Wärmeleitfähigkeit von Stroh*) untersuchte Gersten- und Weizenballen um einen Aussage zu treffen. Demnach ist die Leitfähigkeit der getesteten Gerstenballen geringer als jene der Weizenballen. Ashour begründet dies jedoch mit einem größeren Anteil an Kurzstroh in den Gerstenballen.
Das kann als Hinweis angesehen werden, dass die Verteilung der Partikelgrößen im Ballen einen höheren Einfluss auf die Leitfähigkeit hat, als die Strohsorte.

7 Zur Wärmespeicherfähigkeit von Stroh

Die Wärmespeicherfähigkeit eines Körpers C (J/K) ist abhängig von seinem Volumen V (m³), seiner Rohdichte ρ (kg/m³) und der spezifischen Wärmekapazität c des Stoffes, aus dem der Körper besteht:

$$C = V \cdot \rho \cdot c$$

Die spezifische Wärmekapazität c (J/(kg/K)) ist eine Werkstoffeigenschaft, welche die Wärmemenge Q (J) beschreibt, die benötigt wird, um 1 kg eines Stoffes um 1 K zu erwärmen. Dabei liegt die spezifische Wärmekapazität von mineralischen Baustoffen bei ca. 1000

J/(kgK), von organischen bei ca. 1500, die von Metallen unter 500 und von Wasser bei ca. 4000 J/(kg/K) (vgl. Willems/Schild/Dinter 2006: 2.4).
Die in einem Körper gespeicherte Wärmemenge Q (J) errechnet sich aus dem Produkt der Wärmespeicherfähigkeit C (J/K) und der Temperaturdifferenz ΔT (K) zwischen dem Körper und seiner Umgebung:

$$Q = C \cdot \Delta T$$

Ashour (2003: 55) zitiert aus Murphy et al. (1999), die spezifische Wärmekapazität von Stroh liege wie die von Zellulosedämmstoff bei 2000 J/(kgK).
Wimmer/Hohensinner/Drack (2006: 16) geben die spezifische Wärmekapazität ebenfalls mit 2000 J/(kgK) an.

Tabelle 7.1 stellt die spezifischen Wärmekapazitäten, Rohdichten und die Wärmespeicherfähigkeit eines Kubikmeters verschiedener Stoffe dar.
Es wird deutlich, dass z.B. ein Kubikmeter Wasser aufgrund seiner hohen spezifischen Wärmekapazität eine höhere Wärmespeicherfähigkeit besitzt als ein Kubikmeter Stahl, obwohl dieser um ein vielfaches schwerer ist.
Unter den Wärmedämmstoffen weist Stroh aufgrund seiner hohen spezifischen Wärmekapazität und seiner hohen Dichte eine vergleichsweise hohe Wärmespeicherfähigkeit auf.

Tabelle 7.1: Spezifische Wärmespeicherfähigkeit, Rohdichte und Wärmespeicherfähigkeit verschiedener Baustoffe je Kubikmeter

Baustoff	**Spez. Wärmekapazität c (J/(kgK))**[1]	**Rohdichte ρ (kg/m³)**[3]	**Wärmespeicherfähigkeit C (kJ/K) eines m³**
Stahl	450	7500	3375
Glas	750	2500	1875
Beton	1000	2000	2000
Kalksandstein	1000	2000	2000
Vollziegel	1000	1800	1800
Mineralwolledämmplatten	1030	149	153
Polystyrolschaum (XPS)	1450	45	65
Zellulosefasern	1900	55	105
Strohballen	2000[4]	115	230
Holzfaserdämmplatten	2100[3]	170	357
Wasser	4182[2]	1000	4182

[1] Willems/Schild/Dinter (2006) [2] Kuchling (2001) [3] Waltjen et al. (1999) [4] Murphy et al. (1999)

Teil II – Elastomechanisches Verhalten von Strohballen und Strohballenwänden

1 Grundlagen des elastomechanischen Verhaltens von Baustoffen unter Druckbelastung

1.1 Kraft, Fläche, Spannung und Stauchung

Wird ein Bauteil mit einer Kraft F belastet, treten Verformungen in Abhängigkeit von der Belastungsart und -höhe sowie den Werkstoffkennwerten der Geometrie und der Temperatur des Bauteils auf.
Mit steigender Kraft F steigt die Verformung bis zum Versagen des Bauteils. Das Versagen ist entweder durch den Bruch, durch eine definierte Verformung oder Knicken gekennzeichnet.
Es werden die Belastungsfälle Zug, Druck, Biegung, Schub (Abscherung) und Torsion unterschieden (vgl. Läpple 2006: 2).
Im Rahmen dieser Arbeit wurden umfangreiche Tests zum Verhalten von Strohballen und Strohballenkonstruktionen unter Druckbeanspruchung durchgeführt. Aus diesem Grund wird hier der Belastungsfall „Druck“ erläutert.

Eine reine Druckbelastung liegt vor, wenn eine Kraft F gleichmäßig, senkrecht und in Richtung der Bauteilachse auf ein gerades, prismatisches Bauteil[6] wirkt. Dies ist beispielsweise bei Stützen und Mauern der Fall (vgl. Abbildung 1.1).

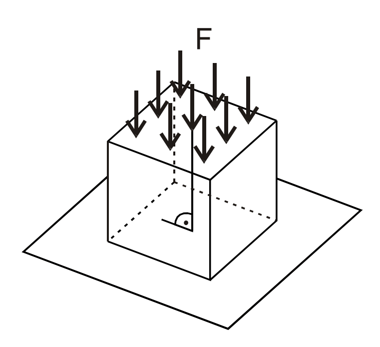


Abbildung 1.1: Gerades, prismatisches Bauteil unter reiner Drucklast

Die auf das Bauteil wirkende Kraft F stellt eine äußere Belastung dar. Diese Kraft ruft eine gleich große, entgegengesetzte „innere Kraft“ hervor. Die Kraft F wirkt gleichmäßig verteilt über alle Punkte der Querschnittsfläche. Diese Kraft pro Fläche ist der Druck, der die Spannung (σ) in einem Bauteil hervorruft. Wie groß die Spannung ist, hängt von der äußeren Kraft F und der Querschnittsfläche A ab, vgl. Abbildung 1.2:

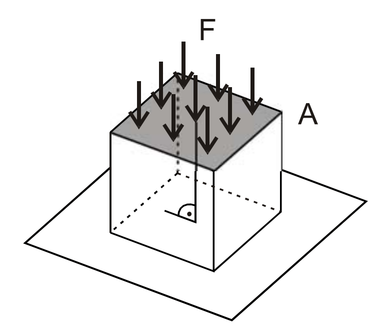


Abbildung 1.2: Kraft pro Fläche

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

dabei ist:

σ: Spannung (N/mm², kN/m²)

F: Senkrecht auf die Fläche wirkende Kraft (N, kN)

A_0: Querschnittsfläche in unbelastetem Zustand (mm², m²)

Unter zunehmender Spannung stellen sich Verformungen des Bauteils ein: Es wird zusammen gedrückt, gestaucht.
Dieser Vorgang wird durch die Stauchung ε beschrieben, indem die Längenänderung des Bauteils ΔL durch die Anfangslänge L_0 dividiert wird, vgl. Abbildung 1.3:

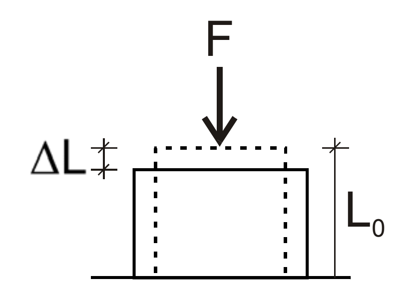


Abbildung 1.3: Stauchung

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

(vgl. Läpple 2006, Dietmann 1982)

[6] gerade: Bauteilachse ungekrümmt; prismatisch: keine Querschnittsänderungen im Bauteil, z.B. Würfel, Zylinder

1.2 Werkstoffverhalten unter Druckbeanspruchung

Unterschieden werden duktile (z.B. Stahl) und spröde (z.B. Keramik) Werkstoffe[7], die ein unterschiedliches Verformungsverhalten aufweisen.

1.2.1 Duktile Werkstoffe

Beim Druckversuch wird in einem Spannungs-Stauchungsdiagramm eine Spannungs-Stauchungskurve ermittelt. In diesem zweidimensionalen Diagramm werden die Spannung auf der Y-Achse (Ordinate) und die Stauchung auf der X-Achse (Abszisse) aufgetragen.
Für duktile Werkstoffe mit einer ausgeprägten Streckgrenze (z.B. Baustahl) kann die in Abbildung 2.4 qualitativ dargestellte Kurve ermittelt werden.

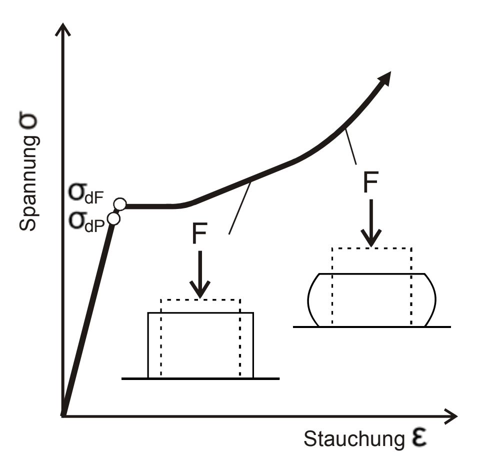


Abbildung 1.4: Spannungs-Stauchungsdiagramm duktiler Werkstoffe mit ausgeprägter Quetschgrenze

Zunächst zeigt die Kurve einen geraden Verlauf, in dem die Stauchung zur Spannungsänderung proportional ist. Dieser Abschnitt wird als „Hooke´sche Gerade" bezeichnet. In diesem Bereich verhält sich der Werkstoff elastisch, d.h. nach dem Entfernen der Spannung nimmt der Körper seine Ausgangsdimensionen an. Der linear-elastische Bereich endet im Punkt σ_{dP} der Proportionalitätsgrenze.
Die weitere Verformung ist plastisch, d.h. der Anteil der Verformung, der über den linear-elastischen Bereich hinausgeht, ist irreversibel. Duktile Werkstoffe mit ausgeprägter Quetschgrenze zeigen ab dem Punkt σ_{dF} ein Fließen. Das Bauteil wird ohne wesentliche Erhöhung der Spannung weiter gestaucht, das Bauteil „fließt". Im Bauteil finden Abgleitvorgänge statt. Zunehmende Vernetzungsneubildungen behindern im weiteren Verlauf das Abgleiten, es kommt zu einer Verfestigung des Werkstoffes. Verformte sich das Bauteil bisher gleichmäßig, so kommt es bei weiter steigender Belastung zu einem Ausbauchen. Bei duktilen Werkstoffen ist auch bei weiter steigender Beanspruchung kein Bruch zu erwarten. In der Praxis kommt es zum Bauteilversagen durch Ausknicken.

1.2.2 Spröde Werkstoffe

Spröde Werkstoffe, z.B. keramische Werkstoffe, verhalten sich zunächst ähnlich wie duktile Werkstoffe. Am Ende des linear-elastischen Bereiches steht jedoch ein abrupter Scher- oder Schiebungsbruch des Bauteils, der den Punkt σ_{dB} kennzeichnet, siehe Abbildung 1.5.

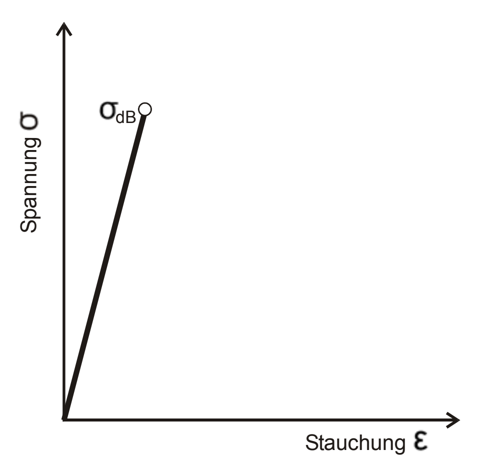


Abbildung 1.5: Spannungs-Stauchungsdiagramm spröder Werkstoffe

Die Druckfestigkeit spröder Werkstoffe errechnet sich wie folgt:

$$\sigma_{dB} = \frac{F_B}{A_0}$$

dabei ist:

σ_{dB}: Bruchspannung (N/mm²)
F_B: Druckkraft beim Abriss oder Bruch des Bauteils (N)
A_0: Querschnittsfläche in unbelastetem Zustand (mm²) (vgl. Läpple 2006, Dietmann 1982).

[7] duktil: *gut dehn-, streck- oder verformbar (*lat. ductilis dehnbar); spröde: *leicht zerspringend, leicht brechend*

1.3 Hooke´sches Gesetz, Elastizitätsmodul

Das Hooke´sche Gesetz drückt im Bereich der Hooke´schen Geraden den Zusammenhang zwischen der Spannung σ und der Stauchung ε aus:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \qquad \text{bzw.} \qquad E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

(Geltungsbereich: Einachsige Zug- od. Druckbeanspruchung im Bereich der Hooke´schen Geraden)

Dabei ist:
σ: Spannung (N/mm², kN/m²)
ε: Stauchung (mm, m)
E: Elastizitätsmodul

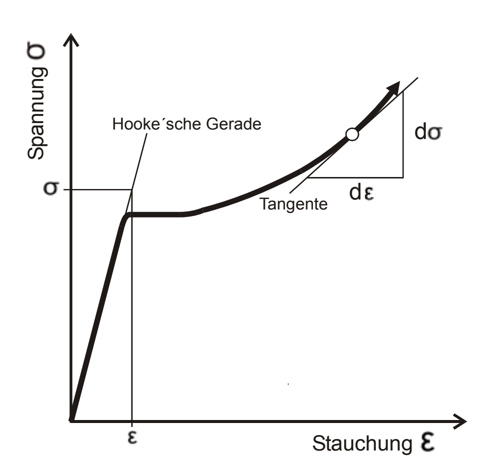


Abbildung 1.6: E-Modul- und Hooke´sche Gerade

Der Elastizitätsmodul (kurz E-Modul) ist ein Proportionalitätsfaktor und entspricht der Steigung der Hooke´schen Geraden im Spannungs-Stauchungsdiagramm.
Außerhalb eines linearen Bereiches in einem Spannungs-Stauchungsdiagramm kann der E-Modul durch das Anlegen einer Tangente für einen bestimmten Punkt bestimmt werden.

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$$

Dabei ist:
E: Elastizitätsmodul
dσ: Spannungsänderung
dε: Stauchungsänderung (vgl. Läpple 2006: 15 f).

Tabelle 1.1: E- Module einiger Werkstoffe (nach Läpple 2006: 320, eigene Umrechnung)

Werkstoff	E-Modul (GPa)	E-Modul (N/mm²)	E-Modul (kN/m²)
Beton	25 … 30	25.000 … 30.000	$25*10^6$ … $30*10^6$
Eisen	210	210.000	$210*10^6$
Holz (Fichte)	10	10.000	$10*10^6$
Hart PVC	3,0 … 3,5	3.000 … 3.500	$3*10^6$ … $3,5*10^6$

1.4 Poisson´sches Gesetz

Aus der Beanspruchung eines Bauteils resultiert nicht nur eine Verformung in Kraftrichtung (Längsstauchung) sondern, wie bereits dargestellt, ebenso eine Verformung in Querrichtung, wobei eine Zugbelastung eine Querstauchung, eine Druckbelastung eine Querdehnung hervorruft, siehe Abbildung 1.7.
Das Verhältnis von Längs- zu Querstauchung wird durch des Poisson´sche Gesetz beschrieben:

$$\varepsilon_q = -\mu \cdot \varepsilon_l \quad \varepsilon_q \qquad \text{bzw.} \qquad \mu = -\left(\frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_l}\right)$$

Dabei ist:
ε_q: Querdehnung
μ: Querkontraktionszahl
ε_l: Längsstauchung

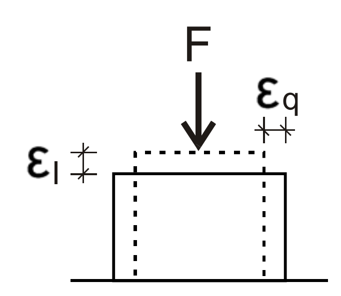


Abbildung 1.7: Querkontraktion

Die Querkontraktionszahl oder Querzahl μ ist eine dimensionslose Werkstoffkonstante.

Der Kehrwert dieser Konstante $m = \frac{1}{\mu}$ wird als Poisson-Zahl bezeichnet:

$$m = -\left(\frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_q}\right)$$

Das negative Vorzeichen in obigen Formeln trägt der Tatsache Rechnung, dass aus einer Stauchung in Längsrichtung eine Dehnung in Querrichtung resultiert.
Querkontraktionszahlen und Poisson-Zahlen einiger Baustoffe vgl. Läpple (2006: 16):

Beton:	μ = 0,15	m = 6,67
Eisen:	μ = 0,29	m = 3,45
Holz (Fichte):	μ = 0,33	m = 3,03
Hart PVC	μ = 0,36	m = 2,78

1.5 *Schiebung (Winkelverzerrung)*

Wird eine Kraft nicht senkrecht zur Bauteilachse oder nicht gleichmäßig im Mittelpunkt des Bauteils eingeleitet, entstehen ein oder mehrachsige Winkelverzerrungen, d.h. das Bauteil verformt sich ungleichmäßig (vgl. Läpple 2006: 89).

2 Stand der Forschung

Mittlerweile existiert eine Vielzahl von Untersuchungen zum elastomechanischen Verhalten von Strohballen und Strohballenwänden. Auf diese Forschungen wird in Anhang II.1, *Zum Stand der Forschung zum elastomechanischen Verhalten von Strohballen und Strohballenwänden*, detailiert eingegangen.
In diesem Kapitel wird das allgemeine Verhalten von Einzelballen und Wänden aus Strohballen unter mechanischer Belastung als Zusammenfassung der Ergebnisse aus Anhang II.1 dargestellt.

2.1 Elastomechanisches Verhalten von Einzelballen

2.1.1 Unverputzte Einzelballen

Unter Druckbelastung werden in Belastungsrichtung Strohballen gestaucht. Dabei gilt:
1. Je höher die Belastung, umso größer die Stauchung.
2. Je höher die Ballendichte, umso geringer die Stauchung (z.B. Bou-Ali 1993).

Aus der durch die Belastung verursachten Stauchung in Belastungsrichtung resultiert eine Dehnung der Strohballen senkrecht zur Belastungsrichtung (Querdehnung), siehe Abbildung 2.1. Dabei gilt:
1. Je höher die Belastung, umso größer die Querdehnung
2. Je höher die Ballendichte, umso geringer die Querdehnung
3. Die Querdehnung ist parallel zur Ballenbindung höher als senkrecht zur Ballenbindung (z.B. Ashour 2003).

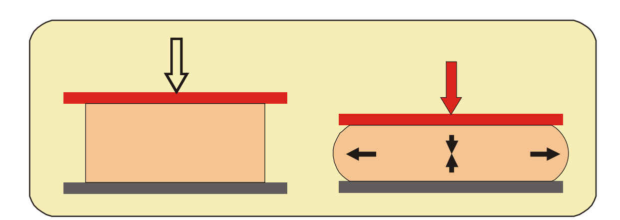


Abbildung 2.1: Verhalten von Einzelballen unter Druckbelastung

2.1.2 Verputzte Einzelballen

Bei verputzten Einzelballen ist weniger der Ballen selber als vielmehr der Putz ausschlaggebend für die Druckfestigkeit. Entscheidend ist ebenso, ob die Kraft direkt in den Putz oder indirekt über den Putz in den Ballen eingeleitet wird. Dabei ist die Druckfestigkeit im ersten Fall deutlich höher. Von der Art der Lasteinleitung hängt auch das Versagensbild ab.
- Bei direkt belastetem Putz tritt ein Versagen durch ein Ausbeulen des Putzes in der Ballenfläche oder durch eine Zerstörung des Putzes im Bereich der Lasteinleitung.
- Wird der Putz indirekt belastet, kommt es zu einem Abscheren desselben im Lasteinleitungsbereich, da sich der Ballen stärker verformt als die Putzschicht. (z.B. Vardy/MacDougall 2006).

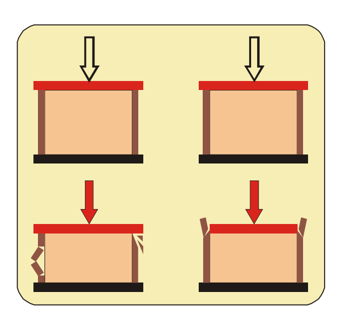


Abbildung 2.2: Typische Versagensbilder verputzter Ballen bei direkt und indirekt belastetem Putz

2.2 Elastomechanisches Verhalten von Wänden aus Strohballen

Die Ausführungen werden untergliedert in:

1. Vertikale Lasten: Belastung der Wand durch Auflast.
2. Horizontale Lasten senkrecht zur Wandebene: Direkt auf die Wand wirkender Winddruck.
3. Horizontale Lasten in der Richtung der Wandebene: Die Wand nimmt Windkräfte aus anderen Wänden aus (Aussteifung).

Siehe auch Abbildung 2.3

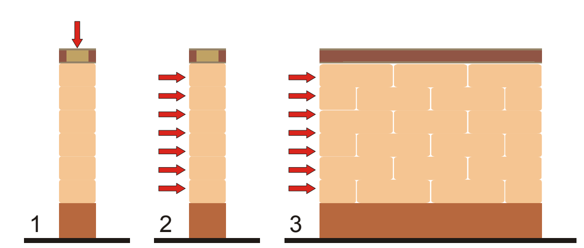


Abbildung 2.3: Belastungsarten: Vertikallast (1), Horizontallast senkrecht zur Wandebene (2), Horizontallast in der Wandebene (3)

2.2.1 Vertikale Lasten

Unverputzte Wände

Das Verhalten unverputzter Wandelemente ist auf den ersten Blick ähnlich dem unverputzter Einzelballen. Aufgrund der größeren Höhe bei gleicher Breite kommt es zu folgenden Versagensbildern (vgl. Abbildung 2.4):

1. Schrägstellung der kompletten Wand
2. Schrägstellung der oberen Lasteinleitungsplatte
3. Ausbeulen der Wand (z.B. Bou-Ali 1993)

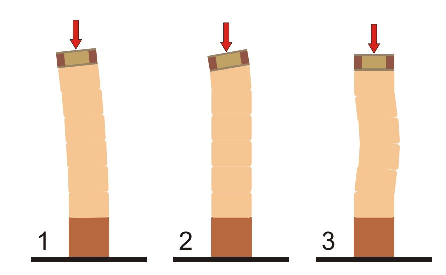


Abbildung 2.4: Verhalten unverputzter Wände unter Horizontallast: Schrägstellung der Wand (1), Schrägstellung der oberen Lasteinleitungsplatte (2), Ausbeulen (3)

Verputzte Wände

Analog zu den verputzten Einzelballen hängt die Festigkeit der Wand entscheidend von der des Putzes ab.

Verputzte Wände gleichen sogenannten Sandwich Konstruktionen, bei denen ein weicher Kern und eine harte „Schale“ so interagieren, dass das Element deutlich belastbarer ist als die Summe der Einzelkomponenten.

Einzeln belastet würde die Schale aufgrund ihrer geringen Dicke sehr schnell ausknicken. Dies verhindert der Verbund mit dem weichen Kern.

Es ist daher evident, dass der Verbund zwischen Strohballen und Putzschale einen signifikanten Einfluss auf die Druckfestigkeit der Wand hat (Vardy/MacDougall 2006, King 2006).

King (2006: 69) identifiziert folgende Versagensbilder bei verputzten Strohballenwänden, vgl. Abbildung 2.5):

1. Globales Ausbeulen der Wand
2. Lokales Ausbeulen der Wand
3. Zerstörung des Putzes im Lasteinleitungsbereich
4. Abrutschen des Putzes im Lasteinleitungsbereich
5. Abscheren des Putzes im Lasteinleitungsbereich (bei indirekt belastetem Putz)

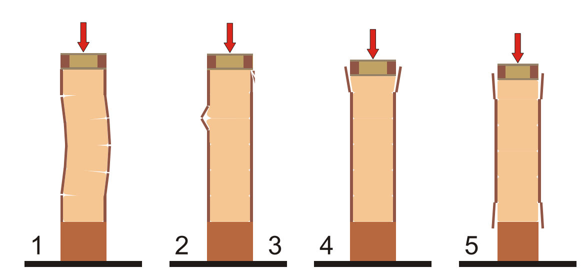


Abbildung 2.5: Versagensbilder verputzter Wände: Globales ausbeulen (1), lokales ausbeulen (2), Zerstörung des Putzes (3), Abrutschen (4), Abscheren (5)

2.2.2 Horizontale Lasten senkrecht zur Wandebene

Laut Bou-Ali (1993) neigen unverputzte Strohballenwände unter Windlast zu globalem Ausbeulen.

King (2006) beschreibt den gleichen Effekt bei verputzten Strohballenwänden. Dabei tritt eine Verformung der Einzelballen vom Rechteck hin zum Parallelogramm ein. Der Putz reißt an den Ballenstößen, wo er auf Zug belastet wird (vgl. Abbildung 2.6).

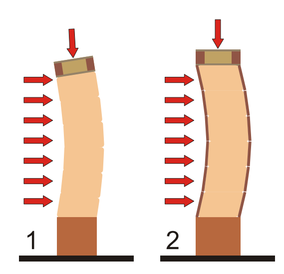


Abbildung 2.6: Verhalten unverputzter (1) und verputzter (2) Strohballenwände unter senkrecht zur Wandebene wirkender Horizontallast

2.2.3 Horizontallasten in Richtung der Wandebene

Bei Strohballenwänden als aussteifende Wände übernehmen die Putzschichten, welche als Schieben wirken, verstärkt durch den Strohkern die Hauptlast.
Die aus der Belastung resultierenden Zugspannungen insbesondere im Bereich der Lasteinleitung erfordern eine Verstärkung des Putzes in Form von Geweben, Gittern oder Fasern.
King (2006: 106ff) beschreibt folgende Versagensursachen im Bezug nicht nur auf Windkräfte sondern auch auf ähnlich gelagerte Belastungen durch Erdbeben, vgl. Abbildung 2.7):

1. Reißen des Putzes durch Zugbeanspruchung im Bereich der Lasteinleitung, Risse laufen auf die der Lasteinleitung entgegengesetzte Wandecke zu.
2. Putzrisse durch Druckbeanspruchung senkrecht zu den Putzrissen durch Zugbeanspruchung
3. Zerstörung des Putzes durch Druckbeanspruchung im Bereich der der Lasteinleitung gegenüberliegenden Wandecke.

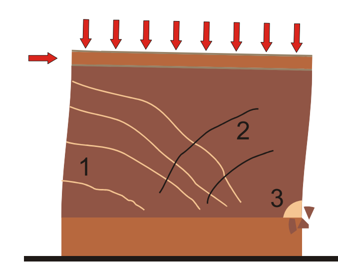


Abbildung 2.7: Versagensbilder bei horizontaler Belastung in Richtung der Wandebene: Risse infolge von Zug- (1), bzw. Druckbeanspruchung (2), Zerstörung des Putzes durch Druckbeanspruchung (3)

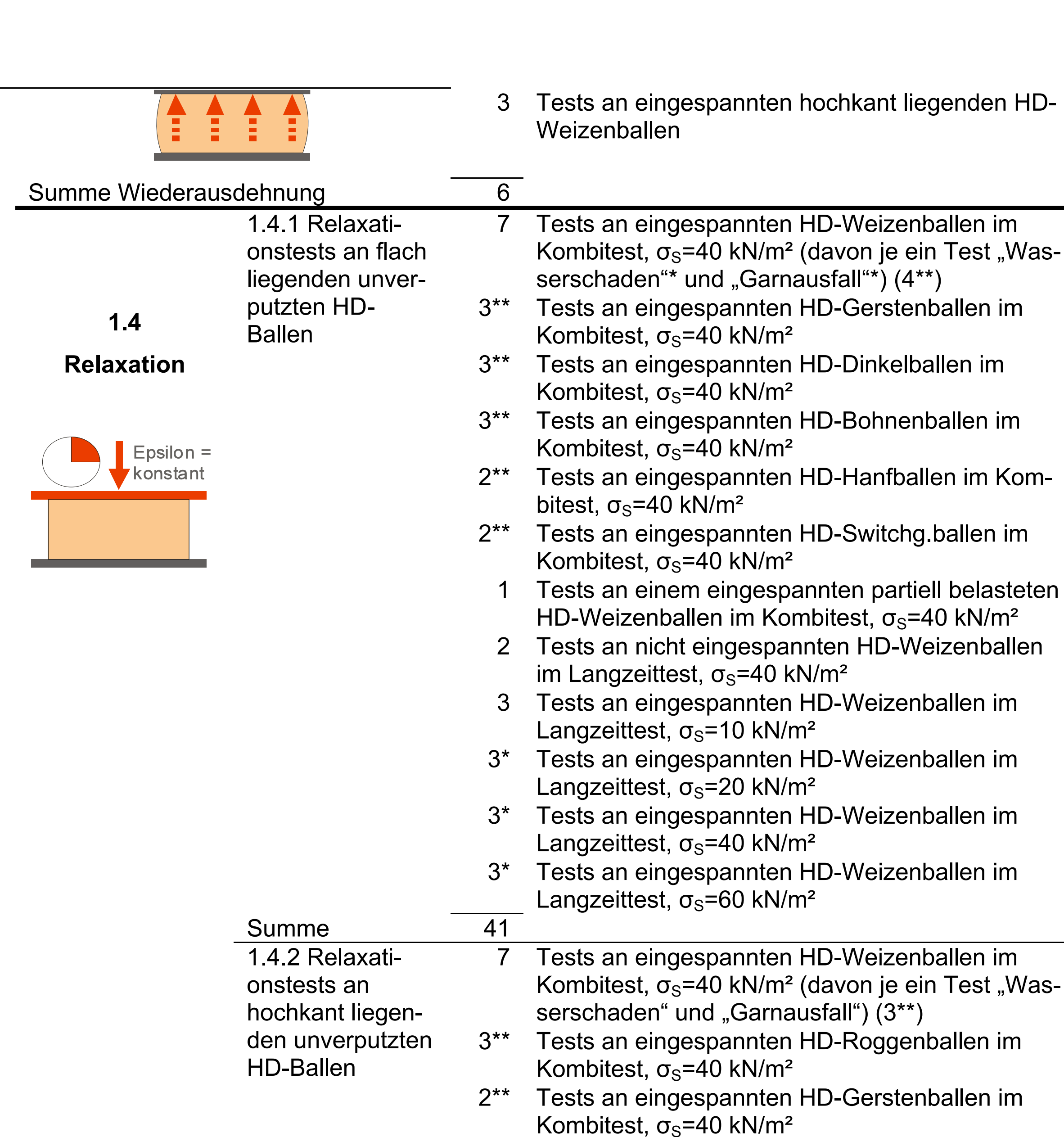
3 Methode

3.1 Testprogramm

Im Rahmen dieser Dissertation wurden 207 Tests zum elastomechanischen Verhalten von Einzelballen und 18 Versuche zum Verhalten von Wänden aus Strohballen durchgeführt. Untersucht wurde das Spannungs-Stauchungsverhalten, das Relaxations- und Kriechverhalten sowie Querdehnung und Wiederausdehnung. Es wurden Tests an Klein- und Großballen durchgeführt, ebenso wurden unterschiedliche Stroharten getestet. Die Ballen wurden in den Orientierungen flach- und hochkant liegend und stehend untersucht. Einige Proben und eine Wand wurden verputzt. Zusätzlich wurde der Einfluss von Wasserschäden und Garnausfällen betrachtet. Zum Testprogramm siehe Tabelle 3.1. Die mit * markierten Tests wurden im Rahmen des DBU-finanzierten Forschungsprojektes „Grundlagen zur bauaufsichtlichen Anerkennung der Strohballenbauweise- Weiterentwicklung der lasttragenden Konstruktionsart und Optimierung der bauphysikalischen Performance“ vom Verfasser durchgeführt. Die mit ** markierten Tests wurden von Timo Struwe im Rahmen seiner Diplomarbeit *Elastomechanisches Verhalten von Strohballen* durchgeführt. Diese Diplomarbeit wurde von Prof. Dr.-Ing. Oliver Hensel und dem Verfasser dieser Dissertation betreut. Für die Tests von Struwe (2007) wurde der im Rahmen dieser Dissertation konstruierte Kombiprüfstand (siehe schnitt 4.3.2.1) verwendet, alle Daten wurden für diese Dissertation neu interpretiert.

Tabelle 3.1: Testprogramm

Dezimalklassifikation			Anzahl	Test
1. Einzelballen	**1.1 Spannungs-Stauchungs-Tests**	1.1.1 Tests an flach liegenden unverputzten HD-Ballen	6*	Tests an HD-Weizenballen ohne seitliche Einspannung
			10	Tests an HD-Weizenballen mit Einspannung (4**)
			3**	Tests an HD-Gerstenballen mit Einspannung
			3**	Tests an HD-Roggenballen mit Einspannung
			3**	Tests an HD-Dinkelballen mit seitlicher Einspannung
			3**	Tests an HD-Bohnenballen mit Einspannung
			2**	Tests an HD-Hanfballen mit seitlicher Einspannung
			1**	Test an einem HD-Switchgrasballen mit Einspannung
			1**	Test an einem HD-Miscanthusballen m. Einspannung
			1	Test an einem partiell belasteten flach liegenden HD-Weizenballen
		Summe	27	
		1.1.2 Tests an hochkant liegenden unverputzten HD-Ballen	6	Tests an HD-Weizenballen ohne seitliche Einspannung
			10	Tests an HD-Weizenballen mit Einspannung (3**)
			3**	Tests an HD-Gerstenballen mit Einspannung
			3**	Tests an HD-Roggenballen mit Einspannung
			3**	Tests an HD-Dinkelballen mit Einspannung
			1	Test an einem partiell belasteten hochkant liegenden HD-Weizenballen
			6	Tests an halbierten und aufeinander gestapelten hochkant stehenden HD-Weizenballen
		Summe	26	
		1.1.3 Tests an stehenden unverputzten HD-Ballen	3	Tests an stehenden HD-Weizenballen ohne seitliche Einspannung
		1.1.2 Tests an unverputzten Q-Weizenballen	3	Tests an unverputzten hochkant liegenden Q-Weizenballen mit seitlicher Einspannung
		1.1.3 Tests an verputzten HD-Weizenballen	3	Tests an flach liegenden Ballen, Lasteinleitung in den Strohballen (indirekt belasteter Putz)
			3	Tests an flach liegenden Ballen, Lasteinleitung direkt in den Putz
			3	Tests an hochkant liegenden Ballen, Lasteinleitung in den Strohballen (indirekt belasteter Putz)
			3	Tests an hochkant liegenden Ballen, Lasteinleitung direkt in den Putz
		Summe	12	
	Summe Spannung-Stauchung		71	
	1.2 Querdehnung		6	Tests an nicht eingespannten flach liegenden HD-Weizenballen
			5	Tests an nicht eingespannten hochkant liegenden HD-Weizenballen
	Summe Querdehnung		11	
	1.3 Wiederausdehnung		3	Tests an eingespannten flach liegenden HD-Weizenballen



		3	Tests an eingespannten hochkant liegenden HD-Weizenballen
Summe Wiederausdehnung		6	
1.4 Relaxation	1.4.1 Relaxationstests an flach liegenden unverputzten HD-Ballen	7	Tests an eingespannten HD-Weizenballen im Kombitest, σ_S=40 kN/m² (davon je ein Test „Wasserschaden"* und „Garnausfall"*) (4**)
		3**	Tests an eingespannten HD-Gerstenballen im Kombitest, σ_S=40 kN/m²
		3**	Tests an eingespannten HD-Dinkelballen im Kombitest, σ_S=40 kN/m²
		3**	Tests an eingespannten HD-Bohnenballen im Kombitest, σ_S=40 kN/m²
		2**	Tests an eingespannten HD-Hanfballen im Kombitest, σ_S=40 kN/m²
		2**	Tests an eingespannten HD-Switchg.ballen im Kombitest, σ_S=40 kN/m²
		1	Tests an einem eingespannten partiell belasteten HD-Weizenballen im Kombitest, σ_S=40 kN/m²
		2	Tests an nicht eingespannten HD-Weizenballen im Langzeittest, σ_S=40 kN/m²
		3	Tests an eingespannten HD-Weizenballen im Langzeittest, σ_S=10 kN/m²
		3*	Tests an eingespannten HD-Weizenballen im Langzeittest, σ_S=20 kN/m²
		3*	Tests an eingespannten HD-Weizenballen im Langzeittest, σ_S=40 kN/m²
		3*	Tests an eingespannten HD-Weizenballen im Langzeittest, σ_S=60 kN/m²
	Summe	41	
	1.4.2 Relaxationstests an hochkant liegenden unverputzten HD-Ballen	7	Tests an eingespannten HD-Weizenballen im Kombitest, σ_S=40 kN/m² (davon je ein Test „Wasserschaden" und „Garnausfall") (3**)
		3**	Tests an eingespannten HD-Roggenballen im Kombitest, σ_S=40 kN/m²
		2**	Tests an eingespannten HD-Gerstenballen im Kombitest, σ_S=40 kN/m²
		3**	Tests an eingespannten HD-Dinkelballen im Kombitest, σ_S=40 kN/m²
		1	Test an einem eingespannten partiell belasteten HD-Weizenballen im Kombitest, σ_S=40 kN/m²
		6	Tests an eingespannten, halbierten und zusammengesetzten HD-Weizenballen im Kombitest, σ_S=40 kN/m²
		3	Tests an nicht eingespannten HD-Weizenballen im Langzeittest, σ_S=20 kN/m²
		3	Tests an nicht eingespannten HD-Weizenballen im Langzeittest, σ_S=40 kN/m²
		3	Tests an eingespannten HD-Weizenballen im Langzeittest, σ_S=10 kN/m²
		3	Tests an eingespannten HD-Weizenballen im Langzeittest, σ_S=20 kN/m²
		6	Tests an eingespannten HD-Weizenballen im Langzeittest, σ_S=40 kN/m²
		3	Tests an eingespannten HD-Weizenballen im Langzeittest, σ_S=60 kN/m²
	Summe	43	
	1.4.3 Relaxationstests an stehenden unver-	3	Tests an nicht eingespannten HD-Weizenballen im Kombitest, σ_S=20 kN/m²

		putzten HD-Weizenb.		
		1.4.4 Relaxationstests an hochkant liegenden unverputzten Q-Weizenballen	3	Tests an eingespannten Q-Weizenballen im Kombitest, σ_S=40 kN/m²
		1.4.5 Relaxationstests an verputzten HD-Weizenballen	3	Tests an eingespannten flach liegenden HD-Weizenballen im Kombitest, Lasteinleitung in den Strohballen (indirekt belasteter Putz), σ_S=40 kN/m² (inkl. der Simulation eines Wasserschadens und eines Garnausfalls)
			3	Tests an eingespannten flach liegenden HD-Weizenballen im Kombitest, Lasteinleitung direkt in den Putz, σ_S=40 kN/m² inkl. der Simulation eines Wasserschadens und eines Garnausfalls)
			3	Tests an eingespannten hochkant liegenden HD-Weizenballen im Kombitest, Lasteinleitung in den Strohballen (indirekt belasteter Putz), σ_S=40 kN/m² (inkl. der Simulation eines Wasserschadens und eines Garnausfalls)
			3	Tests an eingespannten hochkant liegenden HD-Weizenballen im Kombitest, Lasteinleitung direkt in den Putz, σ_S=40 kN/m² inkl. der Simulation eines Wasserschadens und eines Garnausfalls)
		Summe	12	
	Summe Relaxation		102	
	1.5 Kriechverhalten	1.5.1 Kriechverhalten flach liegender HD-Ballen mit Einspannung	4	Tests an HD-Weizenballen σ=20 kN/m²
			3*	Tests an HD-Weizenballen σ=60 kN/m²
			1	Test an einem HD-Switchgrasballen σ=60 kN/m²
			1	Test an einem HD-Miscanthusballen σ=60 kN/m²
			1	Test an einem HD-Weizenballen mit Simulation eines Wasserschadens
	Sigma = konstant	Summe	10	
		1.5.2 Kriechverhalten hochkant liegender HD-Ballen mit Einspannung	3	Tests an HD-Weizenballen σ=20 kN/m²
			3	Tests an HD-Weizenballen σ=60 kN/m²
			1	Test an einem HD-Weizenballen mit Simulation eines Wasserschadens
		Summe	7	
	Summe Kriechverhalten		17	
Summe Einzelballen			**207**	
2. Wandelemente	**2.1 Konstruktionstests mit Wandelementen aus HD-Weizenballen**		5	Konstruktionstests von unverputzten Wänden aus flach liegenden HD-Weizenballen
			1	Konstruktionstest einer unverputzten Wand aus hochkant liegenden HD-Weizenballen
			1	Konstruktionstest einer verputzten Wand aus flach liegenden HD-Weizenballen
	Summe Konstruktionstests		7	
	2.2 Spannungs-Stauchungstests mit Wandelementen aus HD-Weizenballen		3	Spannungs-Stauchungstests an unverputzten Wänden aus flach liegenden HD-Weizenballen (davon 1 *)
			1	Spannungs-Stauchungstest an einer unverputzten Wand aus hochkant liegenden HD-Weizenballen

	1*	Spannungs-Stauchungstest an einer verputzen Wand aus flach liegenden HD-Weizenballen
Summe Spannung-Stauchung	5	
2.3 Schubtests an Wänden aus HD-Weizenballen	1	Schubtest an einer unverputzten Wand aus flach liegenden HD-Weizenballen
	1	Schubtest an einer verputzen Wand aus flach liegenden HD-Weizenballen
Summe Schubtests	2	
2.4 Relaxationstests an Wänden aus HD-Weizenballen	2	Relaxationstests an unverputzten Wänden aus flach liegenden HD-Weizenballen (davon 1*)
	1	Relaxationstest an einer unverputzten Wand aus hochkant liegenden HD-Weizenballen
Epsilon = konstant	1*	Relaxationstest an einer verputzen Wand aus flach liegenden HD-Weizenballen
Summe Relaxationstests	4	
Summe Wandelemente	**18**	
Summe Tests	**225**	

3.2 Begründung zur seitlichen Einspannung der Testballen

Die ursprüngliche Planung des Testprogramms sah keine seitliche Einspannung der zu testenden Strohballen vor. Ziel der Tests an Einzelballen war einerseits das Verhalten von Einzelballen an sich zu untersuchen, und andererseits vom Verhalten der Einzelballen Rückschlüsse auf das Verhalten von Wänden aus Strohballen zu ziehen.
Nach der Auswertung der ersten Testergebnisse wurde jedoch klar, dass die Werte von Einzelballen schwer mit denen von Wänden vergleichbar sind, da Einzelballen innerhalb einer Wand einerseits durch die benachbarten Ballen und andererseits durch die in vielen Strohballenkonstruktionen eingesetzten Strohballennägel und Fundamentanker in ihrer Querdehnung behindert werden.
Daher wurde bei weiteren Tests eine seitliche Einspannung eingeführt, die der Situation eines Strohballens in einer Wand eher entspricht.

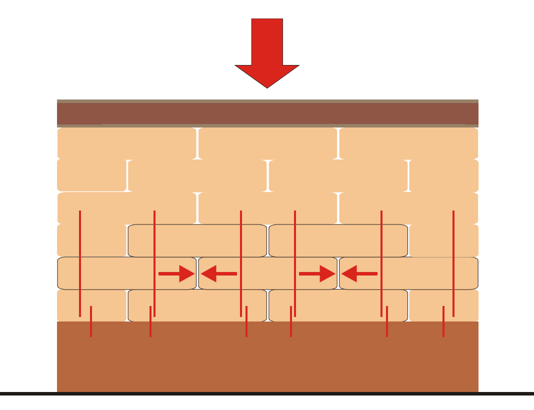


Abbildung 3.1: Einspannung von Einzelballen in Wänden durch Nachbarballen und Verstärkungselemente wie Ballennägel und Fundamentanker

3.3 Definition verwendeter und zu ermittelnder Kennwerte

3.3.1 Dichte der Versuchsballen

Zur Ermittlung der Dichte der Versuchsballen wurde der Ballen gewogen und durch das Produkt aus der in Anlehnung an DIN EN 822 ermittelten Länge, Breite und Höhe der Ballen dividiert. Alternativ zur Höhe und Breite der Ballen wurden bei einigen Versuchen die Kanalmaße der verwendeten Strohballenpresse eingesetzt.

$$\rho = \frac{m}{l_0 \cdot b_0 \cdot h_0}$$

Dabei ist:

ρ : Ballenrohdichte (kg/m³)
m: Masse des Ballens (kg)
l_0 : Ausgangslänge des Ballens in Anlehnung an DIN EN 822 (m)
b_0: Ausgangsbreite des Ballens in Anlehnung an DIN EN 822 (m), alternativ die Breite des Kanals der verwendeten Strohballenpresse
h_0: Ausgangshöhe des Ballens in Anlehnung an DIN EN 822 (m), alternativ die Höhe des Kanals der verwendeten Strohballenpresse

3.3.2 Feuchtegehalt u, ermittelt aus der relativen Luftfeuchte innerhalb der Ballen

Zur Ermittlung des Feuchtegehaltes u wurden die relative Luftfeuchte und die Temperatur mit dem modifizierten kombinierten Feuchte-Temperaturmessgerät des Herstellers Extech (vgl. Abschnitt 1.1.1) gemessen. Dazu wurde die Lanze des Messgerätes bis in die Ballenmitte geschoben und der Wert genommen, nachdem die Anzeige nach ca. 5 Minuten zur Ruhe gekommen war.
Die Werte wurden in die für die entsprechende Strohart geltende, in Teil 1, *Experiment Sorptionsisothermen*, ermittelte Formel nach der BET-Theorie eingesetzt und der massebezogene Feuchtegehalt u berechnet.

3.3.3 Trockenmasse m_{tr} der Versuchsballen

Die Trockenmasse wird aus der Rohmasse und der Masse bezogenen Feuchte wie folgt berechnet:

$$m_{tr} = \frac{m}{1+u}$$

Dabei ist:

m_{tr}: Trockenmasse des Strohballens
m: Rohmasse des Strohballens (kg)
u: Massebezogener Feuchtegehalt des Ballens (g/g)

3.3.4 Trockendichte ρ_{tr} der Versuchsballen

Die Trockendichte der Versuchsballen wird nach folgender Gleichung bestimmt:

$$\rho_{tr} = \frac{m_{tr}}{l_0 \cdot b_0 \cdot h_0}$$

Dabei ist:

ρ_{tr}: Trockendichte der Versuchsballen (kg/m³)
m_{tr}: Trockenmasse des Strohballens (kg), ermittelt nach 3.3.3
l_0 : Ausgangslänge des Ballens in Anlehnung an DIN EN 822 (m)
b_0: Ausgangsbreite des Ballens in Anlehnung an DIN EN 822 (m), alternativ die Breite des Kanals der verwendeten Strohballenpresse
h_0: Ausgangshöhe des Ballens in Anlehnung an DIN EN 822 (m), alternativ die Höhe des Kanals der verwendeten Strohballenpresse

3.3.5 Stauchung in Anlehnung an DIN EN 826

Die Stauchung (negative Dehnung) der Versuchsballen wird in Anlehnung an DIN EN 826 nach folgender Formel ermittelt:

$$\varepsilon = 100 \cdot \frac{X}{h_0}$$

Dabei ist:

ε: Stauchung (%)
X: Verformung (Höhenänderung) (m, mm)
h_0: Ausgangshöhe des Versuchsballens in Anlehnung an DIN EN 822 (m, cm, mm)

3.3.6 Stauchung bei einer Spannung von 40 kN/m² ε_{40}

Die Stauchung ε_{40} wird wie folgt ermittelt:

$$\varepsilon_{40} = 100 \cdot \frac{X_{40}}{h_0}$$

Dabei ist:

ε_{40}: Stauchung bei einer Spannung von 40 kN/m² (%)
X_{40}: Verformung (Höhenänderung) bei einer Spannung von 40 kN/m² (m, mm)
h_0: Ausgangshöhe des Versuchsballens in Anlehnung an DIN EN 822 (m, cm, mm)

3.3.7 Kriechverformung

Die Kriechverformung wird definiert als Stauchung unter konstanter, andauernder Belastung und wird hier nach folgender Formel ermittelt:

$$\varepsilon_K = 100 \cdot \frac{X_K}{h_S}$$

Dabei ist:
- ε_K : Kriechverformung (%)
- X_K: Verformung (Höhenänderung) durch Kriechen (m, mm)
- h_S: Höhe des Versuchsballens unmittelbar nach dem Aufbringen der Last (m, cm, mm)

3.3.8 Gesamtverformung

Die Gesamtverformung wird definiert als die Summe der Verformungen infolge Stauchung und Kriechen. Sie wird hier nach folgender Formel ermittelt:

$$\varepsilon_G = 100 \cdot \frac{X_K + X}{h_0}$$

Dabei ist:
- ε_G : Gesamtverformung (%)
- X: Verformung (Höhenänderung) (m, cm, mm)
- X_K: Verformung (Höhenänderung) durch Kriechen (m, mm)
- h_0: Ausgangshöhe des Versuchsballens in Anlehnung an DIN EN 822 (m, mm)

3.3.9 Ausgangsquerschnitt der Versuchsballen in Anlehnung an DIN EN 826

Der Ausgangsquerschnitt der Versuchsballen wird in Anlehnung an DIN EN 826 wie folgt ermittelt:

$$A_0 = l_0 \cdot b_0$$

Dabei ist:
- A_0: Ausgangsquerschnitt des Probekörpers senkrecht zur Belastungsrichtung (m²)
- l_0 : Ausgangslänge des Ballens in Anlehnung an DIN EN 822 (m)
- b_0: Ausgangsbreite des Ballens in Anlehnung an DIN EN 822 (m), alternativ die Breite des Kanals der verwendeten Strohballenpresse

3.3.10 Druckspannung in Anlehnung an DIN EN 826

Die Druckspannung wird definiert als der Quotient aus der auf den Versuchsballen aufgebrachten Kraft und dem Ausgangsquerschnitt (Abweichend von der DIN wird die Spannung in kN/m² angegeben):

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

Dabei ist:
- σ : Druckspannung (kN/m²)
- F : Druckkraft senkrecht zur Querschnittsfläche (kN)
- A_0: Ausgangsquerschnitt des Probekörpers senkrecht zur Belastungsrichtung (m²)

3.3.11 Druckspannung bei 10% Stauchung σ_{10}

Die Druckspannung σ_{10} wird in Anlehnung an DIN EN 826 als die Spannung definiert, die anliegt, wenn der Strohballen um 10% gestaucht ist (Abweichend von der DIN wird die Spannung in kN/m² angegeben):

$$\sigma_{10} = \frac{F_{10}}{A_0}$$

Dabei ist:
- σ_{10} : Druckspannung bei 10% Stauchung (kN/m²)
- F_{10} : Druckkraft senkrecht zur Querschnittsfläche bei 10% Stauchung (kN)
- A_0: Ausgangsquerschnitt des Probekörpers senkrecht zur Belastungsrichtung (m²)

3.3.12 Druck-Elastizitätsmodul in Anlehnung an DIN EN 826

Der Druck-Elastizitätsmodul ist nach DIN EN 826 (Wärmedämmstoffe für das Bauwesen: Bestimmung des Verhaltens bei Druckbeanspruchung) definiert als das „Verhältnis von Druckspannung zur zugehörigen Stauchung unterhalb der Proportionalitätsgrenze, sofern ein linearer Zusammenhang vorliegt" (EN 826: 3).

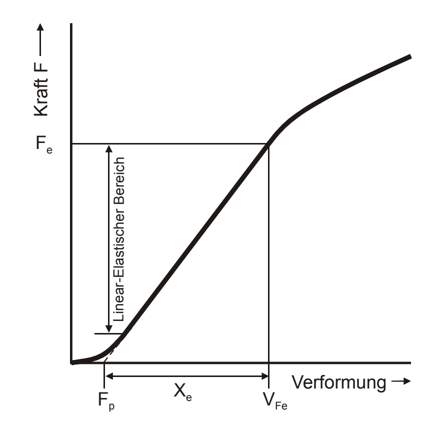


Abbildung 3.2: Zum Druckelastizitätsmodul nach DIN EN 826

Der Druck-Elastizitätsmodul (DIN EN 826) wird wie folgt berechnet:

$$E = \frac{F_e}{A_0} \cdot \frac{h_0}{X_e}$$

Dabei ist:

E : Druck-Elastizitätsmodul (DIN EN 826) (kN/m²)
F_e: Kraft am Ende des konventionell elastischen Bereiches (obere Proportionalitätsgrenze) (kN)
A_0: Ausgangsquerschnitt des Probekörpers senkrecht zur Belastungsrichtung (m²)
h_0: Ausgangshöhe des Prüfkörpers (m)
X_e: Verformung bei F_e (m) (gemessen ab F_p)
F_p: Verformungsnullpunkt (m)

Der Verformungsnullpunkt wird nach DIN EN 826 wie folgt bestimmt:
„Die Nullpunktverformung ist zu bestimmen, indem z.B. mit einem Lineal die steilste gerade Strecke der Kraft-Verformungs-Kurve […] bis zur Nullachse der Kraft F_p verlängert wird“ (EN 826 1996: 5)

Die vorgeschlagene Methode der grafischen Ermittlung von F_p erscheint umständlich und nicht zeitgemäß. Daher wurde folgende Formel zur rechnerischen Bestimmung von F_p entwickelt:

Es wurde eingeführt:

F_a: Kraft am Beginn des konventionell elastischen Bereiches (untere Proportionalitätsgrenze) (kN)
h_a: Höhe des Prüfkörpers bei F_a (m)
h_e: Höhe des Prüfkörpers bei F_e (m)

$$Fp = \frac{-(F_a - \frac{F_e - F_a}{h_e - h_a} \cdot h_a)}{\frac{F_e - F_a}{h_e - h_a}}$$

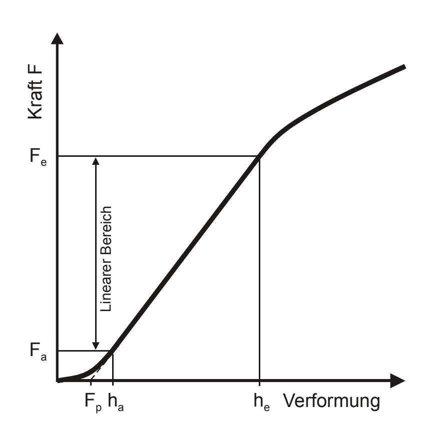


Abbildung 3.3: Zur rechnerischen Ermittlung von F_p und E

Um den E-Modul ohne F_p bestimmen zu können, wurde folgende Formel entwickelt:

$$E = \frac{\frac{F_e}{A_0} - \frac{F_a}{A_0}}{\frac{h_0}{h_e} - \frac{h_0}{h_a}}$$

Ist

σ_e: Die Spannung an der oberen Proportionalitätsgrenze [F_e/A_0] (kN/m²),
σ_a: Die Spannung an der unteren Proportionalitätsgrenze [F_a/A_0] (kN/m²),
ε_e: Die Verformung in % bei σ_e [h_e/h_0*100],
ε_a: Die Verformung in % bei σ_e [h_a/h_0*100],

so lautet die Formel für den Druck-Elastizitätsmodul:

$$E = \frac{(\sigma_e - \sigma_a) \cdot 100}{\varepsilon_e - \varepsilon_a}$$

Es wird für den Nullverformungspunkt analog zu F_p eingeführt: ε_p (%).

$$\varepsilon_p = \frac{-(\sigma_a - \frac{\sigma_e - \sigma_a}{\varepsilon_e - \varepsilon_a} \cdot \varepsilon_a)}{\frac{\sigma_e - \sigma_a}{\varepsilon_e - \varepsilon_a}}$$

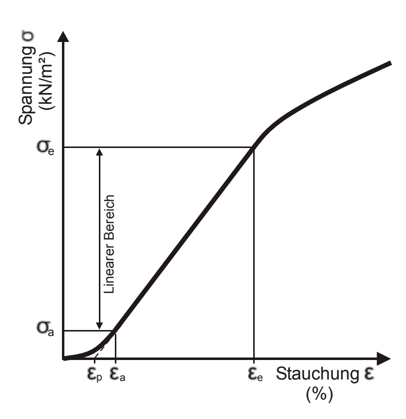


Abbildung 3.4 zur rechnerischen Ermittlung von E und ε_p in % aus der Spannung σ

Soll aus einer Spannung bei bekanntem E-Modul die Stauchung errechnet werden, so gilt folgende Formel:

$$\varepsilon(\%) = \varepsilon_p + \frac{\sigma \cdot 100}{E}$$

3.3.13 Relaxation

Die Relaxation wird als zeitabhängige Abnahme der Spannung bei konstanter Stauchung definiert. Sie drückt die Differenz zwischen Startspannung und Restspannung in Prozent aus:

$$\sigma_X = 100 - \sigma_R$$

Dabei ist:
σ_X: Relaxation (%)
σ_R: Restspannung (%)

mit:

$$\sigma_R = 100 \cdot \frac{\sigma_r}{\sigma_S}$$

Dabei ist:
σ_R: Restspannung (%)
σ_r: Restdruckspannung (kN/m²)
σ_S: (Start-)Druckspannung (kN/m²)

3.3.14 Standardabweichung

Die Standardabweichung ist ein Maß dafür, wie weit sich die jeweiligen Werte um einen Mittelwert streuen. Die Standardabweichung wird hier ausgehend von der Grundgesamtheit berechnet. Alle Werte werden als Argumente angegeben. Die jeweilige Standardabweichung wurde mit Microsoft Excel berechnet. Darauf aufbauend wird die Standardabweichung in Prozent nach folgender Formel berechnet:

$$s_X = 100 \cdot \frac{s_x}{AM}$$

Dabei ist:
s_X: Standardabweichung (%)
s_x: Standardabweichung
AM: Arithmetisches Mittel der entsprechenden Argumente

Je kleiner die Standardabweichung umso enger liegen die Argumente beieinander

3.3.15 Bestimmtheitsmaß

Das Bestimmtheitsmaß R^2 gibt an, in welchem Maß die Varianz einer Variablen durch die Varianz einer anderen Variablen bestimmt wird. Beträgt das Bestimmtheitsmaß für zwei Variablen X und Y beispielsweise $R^2 = 0,5$, dann kann die Hälfte (50%) der Streuung von Y durch lineare Abhängigkeit von X erklärt werden. Das jeweilige Bestimmtheitsmaß wird in dieser Arbeit mit dem Programm Microsoft Excel berechnet.

3.4 *Versuchsdurchführungen*

3.4.1 Tests mit dem Prüfstand „Toni Technik“

Nach dem Folgend beschriebenen Verfahren wurden die Ballen mit den Probennummern 1.1.1.1 bis 1.1.2.6 geprüft. Die Versuche wurden an der Materialprüfanstalt der Universität Kassel durchgeführt.
Der zu prüfende Ballen wurde mit den unter 4.4 beschriebenen Hilfsmitteln gewogen, in seiner Länge gemessen und mittig in die unter 4.3.1 beschriebene Prüfeinrichtung „Toni Technik“ eingebracht. Die Lasteinleitungsplatte der Prüfeinrichtung wurde auf 36 cm (Kanalmaß der Strohballenpresse) abgesenkt und das Prüfprogramm gestartet. Zunächst wurde durch das Absenken der Lasteinleitungsplatte eine Kraft von 1,7 kN aufgebaut (Diese entspricht je nach Ballenlänge, einer Spannung von bis zu 3,7 kN/m²). Ab diesem Punkt begann die Wegmessung. Es wurde Weg gesteuert mit einer Geschwindigkeit von 0,42 mm/s bis zum Erreichen des maximalen Kolbenweges vom 250 mm (erreicht nach 10 Minuten) gefahren. Nach dem Entlasten des Ballens wurde der Versuch mit der nächsten Probe wiederholt. Auf diese Weise wurden insgesamt 12 Weizenballen geprüft.

Bei 11 Weizenballen (Probennummern 1.1.1.2-1.1.2.6) wurde zusätzlich alle 5 kN die Länge der Proben mit einem Gliedermaßstab in der Probenmitte gemessen und notiert.

3.4.2 Tests mit dem HD-Ballen Kombiprüfstand

Die Versuche mit den Proben 1.1.3.1-1.1.4.3, 1.4.1.1-1.4.18.2, 1.5.1.1-1.5.9.1 wurden mit dem im Rahmen dieser Dissertation entwickelten, unter 4.3.2.1 beschriebenen, Kombiprüfstand durchgeführt. Die Tests fanden, abgesehen von den Untersuchungen an den Proben 1.4.1.1-1.4.18.2, welche von Timo Struwe im Rahmen seiner Diplomarbeit (Struwe 2007) in Witzenhausen durchgeführt wurden, im Keller des FEB Kassel statt. Getestet wurden das Spannungs-Stauchungsverhalten, das Relaxations- und Kriechverhalten. Die Testabläufe sind schematisch in Abbildung 3.5 dargestellt.

3.4.2.1 Spannungs-Stauchungsverhalten

Die Proben wurden mit den unter 4.4 beschriebenen Werkzeugen gewogen, in ihrer Länge, Breite und Höhe vermessen und die relative Luftfeuchte sowie die Temperatur in der Ballenmitte bestimmt.

Die Proben wurden mittig in den Prüfstand eingebracht und arretiert (Behinderung der Längsdehnung). Die Lasteinleitungsplatte wurde aufgelegt, Kraftmessdose und Joch in Position gebracht. Die Ballenabmessungen wurden in eine Exceltabelle eingetragen, mit deren Hilfe der Digit-Wert bestimmt wurde, welcher der Spannung von 40 kN/m² entspricht, bis zu der das Spannungs-Stauchungsverhalten getestet wurde.
Dieser Wert wurde mit Hilfe des externen Tastaturinterfaces der SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung) in die Steuerung eingegeben und der Test gestartet.
Der Ballen wurde nun bis zu einer Spannung von 40 kN/m² (bei stehenden Ballen bis 20 kN/m²) belastet (1 in Abbildung 3.5). Dabei wurde für jeden Millimeter die Verformung und die dazugehörige Kraft (in Digits) automatisch in der SPS gespeichert. Vor dem Start und nach Erreichen der Endspannung sowie bei Bedarf dazwischen wurden Fotos gemacht, Beobachtungen wurden während des Tests notiert. Die Tests dauerten, je nach dem wie viel die Ballen zusammengedrückt wurden, zwischen 1,5 und 4 Minuten.
Direkt nach Erreichen der Endspannung schalteten die Motoren ab und hielten so die Stauchung konstant. Es schloss sich der Relaxationstest an.

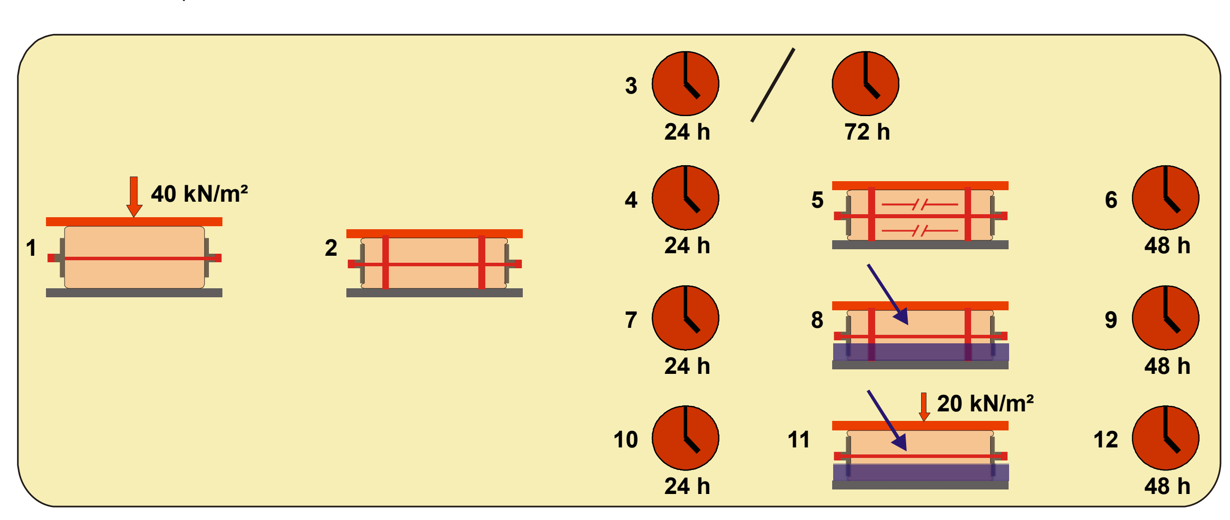


Abbildung 3.5: Schematischer Ablauf der Tests mit dem HD-Ballen Kombiprüfstand

3.4.2.2 Relaxationstest

Die Relaxationstests (2 in Abbildung 3.5) schlossen sich nahtlos an die Spannungs-Stauchungstests an. Bei konstanter Stauchung wurde die Spannung stündlich über 24 bzw. 72 Stunden gemessen (3). Anschließend wurden die aufgezeichneten Daten aus der SPS geladen und mittels einer Excel Tabelle weiterbearbeitet.

3.4.2.3 Simulation eines Garnausfalls (Relaxation)

Zur Simulation eines Garnausfalls wurde nach einem Spannungs-Stauchungstest zunächst die Relaxation über 24 Stunden gemessen (2, 4 in Abbildung 3.5), um sicher zu stellen, dass sich der Testballen ähnlich verhält wie andere Ballen. Dann wurden die Garnbänder durchtrennt (5) und die Relaxation über weitere 48 Stunden aufgenommen (6).

3.4.2.4 Simulation eines Wasserschadens (Relaxation)

Für diesen Versuch wurde der Prüfstand mit einer Folie ausgerüstet, die unter und um den Ballen herum eine wasserundurchlässige Wanne bildet.
Nach dem Erreichen der Maximalkraft aus dem vorangehenden Spannungs-Stauchungstest (1 in Abbildung 3.5) wurde die Stauchung konstant gehalten und die Relaxation stündlich über 24 Stunden aufgezeichnet (2, 7). Nun wurde Wasser bis zu einer Höhe von 10 cm in die beschriebene Wanne eingegossen (8), konstant gehalten und die Relaxation über weitere 48 Stunden stündlich aufgezeichnet (9).

3.4.2.5 Simulation eines Wasserschadens (Kriechen)

Für diesen Versuch wurde der Prüfstand mit einer Folie ausgerüstet, die unter und um den Ballen herum eine wasserundurchlässige Wanne bildet.
Nach dem Erreichen der Maximalkraft aus dem vorangehenden Spannungs-Stauchungstest (1 Abbildung 3.5) wurde die Stauchung kons-

tant gehalten und die Relaxation stündlich über 24 Stunden aufgezeichnet (2, 10).
Die SPS wurde so programmiert, dass sie, sobald die Spannung unter 20 kN/m² fällt, so lange nachdrückt, bis die 20 kN/m² wieder erreicht und konstant hält (Kriechmodus).
Nach der Relaxationsphase von 24 h wurde Wasser bis zu einer Höhe von 10 cm in die beschriebene Wanne eingegossen und konstant gehalten (11). Durch den Einfluss des Wassers sank die Spannung unter 20 kN/m², die SPS erhöhte die Spannung auf 20 kN/m², die Kriechphase begann. Die Wegänderung wurde über 48 h jeden Zehntel Millimeter aufgezeichnet (12).

3.4.2.6 Spannungs-Stauchungstests an verputzten Strohballen

Es wurden insgesamt 12 Spannungs-Stauchungstests, je 6 an flach liegenden und hochkant liegenden, verputzten Strohballen durchgeführt.
Je Halmorientierung wurden 3 Tests, bei welchen die Last direkt in den Putz eingeleitet wurde, und 3 Tests, bei denen die Last nur indirekt über die Strohballen in den Putz eingeleitet wurde, vorgenommen (vgl. Abbildung 3.6). Die Lasteinleitungsbreite betrug bei den Tests, bei denen die Ballen indirekt belastet wurden, 32 cm. Die Maximalspannung, sowie alle Spannungswerte beziehen sich bei diesen Tests auf die Lasteinleitungsbreite.
Bei den Tests, bei denen eine direkte Krafteinleitung in den Putz erfolgte, wurde ein kraftschlüssiger Verbund zwischen Putz und Lasteinleitungsplatte mit Gips hergestellt.

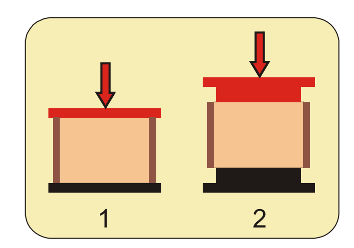


Abbildung 3.6: Lasteinleitung direkt (1) und indirekt (2) in die Putzschicht

Um einen Einfluss der unterschiedlichen Ballenabmessungen hinsichtlich der Halmorientierung auszuschließen und somit direktere Aussagen über des Verhalten des Putzes zu erhalten, wurden die flach liegenden Ballen auf 36 cm, das Maß der hochkant liegenden Ballen, beschnitten.
Die Probeballen wurden zunächst in einen Holzrahmen eingebaut, der 2 cm über die Ballenoberfläche hinaus stand. Dann wurde der Ballen befeuchtet, bis zur Kante des Holzrahmens mit Gubel Grubenlehm verputzt und das Trocknen des Lehmes abgewartet. Nach dem Trocknen wurden Holzleisten von einem cm Stärke auf den Rahmen aufgebracht, die erste Putzschicht angefeuchtet und die zweite Putzlage einen cm stark aus Maxit Lehmputz IP 334 aufgebracht. Auf diese Weise wurde ein drei cm starker, zwei lagiger Lehmputz auf die Probeballen aufgebracht. Daten zu den Lehmputzen sind unter 4.2 dokumentiert.
Die Proben wurden nach dem vollständigen Trocknen in den Prüfstand eingebracht und der Versuch wie oben beschrieben durchgeführt.

3.4.2.7 Spannungs-Stauchungstests mit partiell belasteten, unverputzten Ballen

Bei Last tragenden Strohballenkonstruktionen bildet ein Ringbalken aus Holz bzw. eine verwindungssteife Holzbox oder Leiterkonstruktion den oberen Abschluss der Wand. Besonders bei Konstruktionen aus Quaderballen kann dieser obere Abschluss erhebliche Kosten verursachen, die verringert werden können, wenn der Ringbalken nicht die gesamte Wandbreite überspannt. Aus diesem Grund wurde untersucht, welche Auswirkung eine partielle Belastung (vgl. Abbildung 3.7) auf das Spannungs-Stauchungsverhalten von flach liegenden und hochkant liegenden, eingespannten unverputzten Einzelballen hat. Es wurde je ein flach und ein hochkant liegender Weizenballen getestet.
Verwendete Proben: 1.4.14.1 und 1.4.15.1.
Der Test wurde analog zu den beschriebenen Spannungs-Stauchungstests durchgeführt. Jedoch wurde zwischen die Lasteinleitungsplatte und die Ballenoberfläche ein Balken mit einer Breite von 19,8 cm eingebracht und die Ballenoberfläche auf diese Weise nur partiell belastet. Die angegebenen Spannungen beziehen sich auf die Ballengrundfläche nicht auf die Lasteinleitungsfläche.

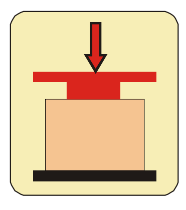


Abbildung 3.7: Partiell belastete Probe

3.4.2.8 Spannungs-Stauchungstests mit halbierten und zusammengesetzten halbierten, unverputzten Ballen mit seitlicher Einspannung

Diese Testreihe soll die Frage klären, ob bei Wänden aus hochkant liegenden Ballen die Halme der übereinander liegenden Ballen „ineinander rutschen“ und wie dem gegebenenfalls entgegen zu wirken ist.

Dazu wurden fünf Strohballen zur Stabilisierung mit zwei weiteren Bindungen versehen und dann in der Mitte zwischen den Ballenschnürungen geteilt (1 in Abbildung 3.8).
Die beiden Hälften des ersten Strohballens wurden in zwei getrennten Versuchen getestet um zu erfahren, ob sich die geteilten Ballen prinzipiell anders verhalten als ungeteilte Ballen (2). Die beiden Hälften von Ballen 2 und 3 wurden je mit der Schnittseite aufeinander gelegt und getestet (3). Mit Ballen 4 und 5 wurde analog verfahren, jedoch wurde zwischen die Ballenhälften ein dünnes Stahlblech eingelegt, um ein ineinander Gleiten der Halme der beiden Hälften auszuschließen (4).
Der weitere Testablauf entspricht dem der oben beschriebenen Spannungs-Stauchungstests.
Verwendete Proben: 1.4.16.1-1.4.18.2

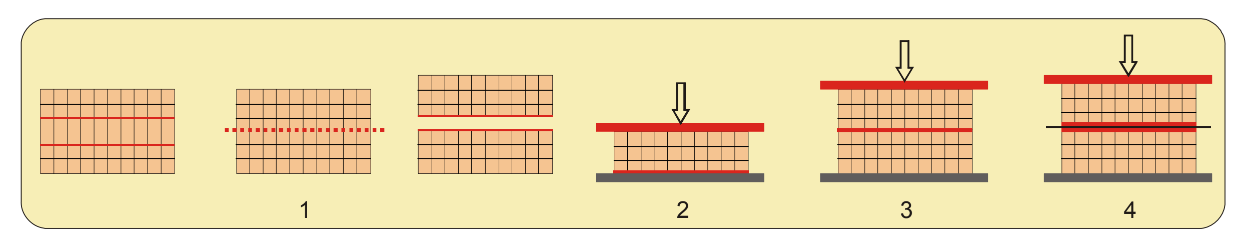


Abbildung 3.8: Belastungstests mit halbierten Ballen

3.4.2.9 Spannungs-Stauchungstests an stehenden HD-Ballen mit dem HD-Ballen Kombiprüfstand

Getestet wurden drei HD-Kleinballen Probennummern 1.5.3.1-1.5.3.3 aus Weizenstroh. Die Durchführung erfolgte analog den flach- und hochkant liegenden Strohballen wie oben beschrieben. Jedoch wurden die Ballen seitlich nicht eingespannt und vor dem Versuch auf eine Länge von ca. 75 cm gekürzt um ein Einbringen in den Prüfstand zu ermöglichen. Je nach Höhe der Stauchung verstrichen bis zum Erreichen der Endspannung von 20 kN/m² 2:36-3:40 Minuten.

3.4.2.10 Wiederausdehnungstests mit dem HD-Ballen Kombiprüfstand

Nach den Spannungs-Stauchungstests mit den Proben 1.1.3.1-1.1.4.3 wurde die Last entfernt und die Wiederausdehnung der Proben über einen Zeitraum von bis zu 91 h gemessen, um zu erfahren, inwieweit sich Strohballen nach einer Kurzzeitbelastung elastisch verhalten. Dazu wurde der HD-Ballen Kombiprüfstand zusätzlich mit Wegmessern und einem Datenlogger, wie unter 4.3.2.2 beschrieben, ausgerüstet.

3.4.2.11 Kriechtest mit dem Kombiprüfstand

Der Kriechtest an Probe 1.2.4.2 wurde mit dem HD-Ballen Kombiprüfstand durchgeführt. Der anfängliche Testablauf entspricht dem oben beschriebenen für Spannungs-Stauchungstests. Die SPS wurde so programmiert, dass nach dem Erreichen der Endspannung von 40 kN/m² immer dann nachgedrückt wurde, sobald die Spannung messbar (1 Digit) gefallen war.
Auf diese Weise wurde die Spannung über einen Monat konstant gehalten.

3.4.3 Tests mit dem Q-Ballen Kombiprüfstand

Die Versuche mit den Proben 1.6.1.1-1.6.1.3 wurden mit dem im Rahmen dieser Dissertation entwickelten, unter 4.3.2.2 beschriebenen Kombiprüfstand, durchgeführt. Die Tests fanden in einer Außenklimahalle auf Hof Nesselbach bei Grebenstein statt.
Getestet wurden das Spannungs-Stauchungsverhalten sowie das Relaxationsverhalten von Quaderballen.
Bei dem ersten Test (Probe 1.6.1.1) brach das Hauptjoch. Es wurde verstärkt und der Test fortgesetzt. Bei den beiden folgenden Tests kam ein neues Stahl verstärktes Joch zum Einsatz.

Spannungs-Stauchungsverhalten
Die Proben wurden mit den unter 4.4 beschriebenen Werkzeugen gewogen, in ihrer Länge, Breite und Höhe vermessen und die relative Luftfeuchte sowie die Temperatur in der Ballenmitte bestimmt.
Die Proben wurden mittels eines Hallenkrans mittig in den Prüfstand eingebracht und arretiert (Behinderung der Längsdehnung). Die Lasteinleitungskonstruktion wurde aufgelegt, Kraftmessdose und Joch in Position gebracht. Die Ballenabmessungen wurden in eine Exceltabelle eingetragen, mit deren Hilfe der Digit-Wert bestimmt wurde, welcher der Spannung von 40 kN/m² entspricht, bis zu der das Spannungs-Stauchungsverhalten getestet werden sollte.

Dieser Wert wurde über einen PC in die Speicher programmierbare Steuerung (SPS) eingegeben.
Der Ballen wurde nun bis zu einer Spannung von ca. 40 kN/m² belastet. Dabei wurden die Verformung und die dazugehörige Kraft (in Digits) jeden zwanzigstel Millimeter automatisch in der SPS gespeichert. Vor dem Start und nach Erreichen der Endspannung sowie bei Bedarf dazwischen wurden Fotos gemacht. Beobachtungen wurden während des Tests notiert. Beim Erreichen des maximalen Kolbenhubs des Hydraulikstempels wurde das Joch wie unter 4.3.2.2 beschrieben umgesetzt und der Test fortgeführt. Die Tests dauerten, vor allem verzögert durch das Umsetzten der Joche, zwischen 8 und 38 Minuten.
Direkt nach Erreichen der Endspannung stoppte der pneumatisch-hydraulische Antrieb und hielt so die Stauchung konstant. Es schloss sich der Relaxationstest an.

Relaxationstest
Die Relaxationstests schlossen sich nahtlos an die Spannungs-Stauchungstests an.
Bei konstanter Stauchung wurde die Spannung stündlich über bis zu 30 Tage gemessen. Anschließend wurden die aufgezeichneten Daten aus der SPS geladen und mittels einer Exceltabelle weiterbearbeitet.

3.4.4 Tests mit den Relaxationsprüfständen

Die Tests mit den Proben der Reihe 1.3 wurden im Keller des Forschungslabors für experimentelles Bauen (FEB) an der Uni Kassel durchgeführt.
Für die Durchführung wurden parallel drei der unter 4.3.3 beschriebenen Relaxationsprüfstände verwendet.
Der zu prüfende Ballen wurde mit den unter 4.4 beschriebenen Werkzeugen gewogen, in seiner Länge gemessen, in den Relaxationsprüfstand eingebracht und seitlich arretiert. Mithilfe der Gewindestangen wurde die berechnete Kraft aufgebracht. Nach jeweils 10 Minuten wurde eine volle Stunde lang die Kraft wieder auf den berechneten Wert erhöht. Erst dann wurde die Relaxation zunächst in größer werdenden zeitlichen Abständen gemessen, später in der Regel täglich eine Messung durchgeführt. Nach Ablauf eines Monats wurde der Vorgang mit der nächsten Probe wiederholt. Bei späteren Tests wurde die Spannung alle 12 Stunden von einem Datenlogger aufgezeichnet.

Es wurden so insgesamt 38 Weizenstrohballen bei Anfangsspannungen von 10, 20, 40 und 60 kN/m² flach- und hochkant liegend geprüft.

3.4.5 Tests mit dem Kriechprüfstand

Die zu testenden Proben wurden vermessen, gewogen und in den unter 4.3.3 beschriebenen Kriechprüfstand eingebracht. Die Ballen wurden mittels der seitlichen Einspannung fixiert und anschließend die Last durch Absenken und Beschweren des Lastarmes aufgebracht.
Die Tests mit den Proben 1.2.0.1 und1.2.1.2 wurden im Hof des Forschungslabors für experimentelles Bauen (FEB) an der Uni Kassel, alle anderen Kriechtests im Keller des gleichen Instituts durchgeführt.
Der zu prüfende Ballen wurde mit den unter 4.4 beschriebenen Werkzeugen gewogen, in seiner Länge gemessen, seine Feuchtigkeit und Temperatur bestimmt und in den unter 4.3.3 beschriebenen Kriechprüfstand eingebracht.
Zunächst wurde der Ballen mit Hilfe von Gewindestangen vorgespannt, sodann das Gewicht am Lastarm bis zum Erreichen der vorher errechneten Kraft erhöht. Dabei wurde darauf geachtet, dass es zu keiner Winkelverzerrung im zu prüfenden Strohballen kam. Zeichnete sich eine solche ab, wurde der Ballen entlastet und neu justiert. Nach dem Erreichen der jeweiligen Prüfspannung begann die Wegmessung. Bei den Tests mit den Proben 1.2.0.1-1.2.2.3 erfolgte diese in zeitlich größer werdenden Abständen manuell mittels einer Schieblehre (siehe Abschnitt 4.4.3), bei den Proben 1.2.2.4-1.2.4.2 stündlich mittels einer Wegmessung, welche dem unter 4.3.2.2 beschriebenen System entspricht. Nach dem Ende des Testes wurde der Ballen ausgespannt und gelagert.
Auf diese Weise wurde je ein Switchgras- und Miscanthusballen sowie 14 HD-Weizenstrohballen getestet.

3.4.6 Versuche an Wänden aus Strohballen

Bei Wänden aus Strohballen sollte nicht nur das elastomechanische Verhalten untersucht werden, sondern auch Konstruktions- und Aufbaumethoden entwickelt und getestet werden.
Daher sind Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung Teil des Tests und werden in Anhang II.2. dargestellt

4 Material

4.1 Strohballen

Im Rahmen dieser Arbeit wurden insgesamt 225 Strohballen zu Testzwecken verwendet. Davon entfällt der größte Teil mit 169 ganzen und 26 gekürzten Ballen auf HD-Ballen aus Weizenstroh. Daneben wurden je 6 HD-Ballen aus Weizen- Roggen- und Gerstenstroh sowie 3 HD-Ballen aus Bohnenstroh und je 2 aus Hanffasern, Switchgras und Miscanthus untersucht. Zusätzlich wurden 3 Quaderballen aus Weizenstroh getestet.

Das Stroh der verwendeten Stroharten wies deutliche Unterschiede in der Erzeugungsweise, der Ernte- und Presstechnik sowie in der strukturellen Beschaffenheit auf. Timo Struwe führte im Rahmen seiner Diplomarbeit (Struwe 2007: 29) im Vorfeld seiner Versuche optische und taktile Untersuchungen zur Bewertung der strukturellen Beschaffenheit der Versuchsballen durch, die in Tabelle 4.1 wiedergegeben sind:

Tabelle 4.1: Eigenschaften der untersuchten Strohballen (nach Struwe 2007: 29)

Strohart	Erzeugungs-weise	Mäh-drescher	Ballen-presse	Strukturelle Beschaffenheit des Strohs
Weizen (Triticum aestivum)	ökologisch	Claas Compact 40	Welger AP 53	Großer Anteil Langstroh, sehr steife Stängel mit gut erhaltener, kaum geknickter Rohrstruktur, wenig gesplissen
Gerste (Hordeum vulgare)	konventionell	ICH 541	Claas Markant 40	Großer Anteil an Langstroh, weniger steife Stängel als bei Weizenstroh aber mit vergleichbarer, kaum geknickter Rohrstruktur, wenig gesplissen
Roggen (Secale cereale)	k.A.	Claas Maxi 88 SL	Welger AP 63	Etwas geringerer Anteil Langstroh als bei Weizen und Gerste, großer Anteil stark geknickter und platt gedrückter Stängel, hoher Beikrautanteil
Dinkel (Triticum spelta)	ökologisch	k.A.	Welger AP 53	Sehr heterogene Struktur, große Unterschiede im Bezug auf Länge, Gesplissenheit und Erhalt der Rohrstruktur der Stängel, hoher Beikrautanteil
Switchgras (Panicum virgantum)	ökologisch	k.A.	Welger AP 53	Hoher Anteil Langstroh, mäßig geknickt, wenig gesplissen, sehr dünne Stängel
Ackerbohnen (Vicia faba)	ökologisch	Claas Compact 40	Welger AP 53	Sehr großer Anteil Kurzstroh, sehr hoher Anteil gesplissenes und zerfasertes Stroh, sehr holzig und hart, keine einheitliche Ausrichtung der Stängelbestandteile

4.2 Lehmputze

Für die Tests an verputzten Strohballen und an der verputzten Strohballenwand wurde als Unterputz ein fetter Gumbel Ziegeleilehm, für den Oberputz der Maxit IP 334 Lehmputz grob verwendet. Beide Putze wurden 2006 am FEB im Rahmen eines noch unveröffentlichten Forschungsprojektes untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.2 dargestellt.

Tabelle 4.2: Angaben zu den verwendeten Lehmputzen

Lehmputz	Korngröße (mm)	Trockenschwindmaß (mm/m)	Biegezugfestigkeit (kN/m²)	Druckfestigkeit (kN/m³)
Gumbel Ziegeleilehm	0-5	k.A.	232	2286
Maxit IP 334 Lehmputz grob	0-1,5	10,5	197	1352

4.3 Prüfstände

4.3.1 Prüfstand „Toni Technik“

Die Versuche mit den Proben 1.1.1.1 bis 1.1.2.3 (Kurzzeitversuche ohne seitliche Einspannung der Strohballen) wurde an der Materialprüfanstalt der Uni Kassel mit einer Prüfmaschine der Marke „Toni Technik“ durchgeführt. Die Maschine kann über eine elektronische Steuerung Weg- und Zeit gesteuert gefahren werden. Die Maximalkraft beträgt 200 kN.



Abbildung 4.1: Prüfstand Toni Technik

4.3.2 Kombiprüfstände

Kombiprüfstände stellen die im Rahmen dieser Dissertation am weitesten entwickelten Einzelballenprüfstände dar. Gebaut wurden ein HD-Ballenprüfstand und 2 Großballenprüfstände, von denen jedoch nur einer in Betrieb war.

4.3.2.1 HD-Ballen Kombiprüfstand

Die Versuche mit den Proben 1.1.3.1-1.1.4.3, 1.4.1.1-1.4.18.2, 1.5.1.1-1.5.9.1 wurden mit dem im Rahmen dieser Dissertation entwickelten Kombiprüfstand durchgeführt.
Der HD-Ballen Kombi-Prüfstand ermöglicht es, sowohl Spannungs-Stauchungs- als auch Relaxations- und Kriechtests zu durchzuführen. Er verfügt über einen elektrischen Antrieb, der über eine Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS), die auch als Datenlogger eingesetzt wird, in Verbindung mit einer Kraftmessdose und einem Wegmesser angesteuert wird.

Beschreibung des Prüfstandes: Im Wesentlichen besteht der Prüfstand aus der unteren und der oberen Lasteinleitungsplatte, die über ein Joch und 2 Gewindestangen M16, Festigkeitsklasse 10.6 zusammengepresst werden können. Die untere Lasteinleitungsplatte ruht auf vier 70 cm hohen Beinen.
Die Gewindestangen werden durch 2 Rohrmotoren (Typ Triton TEM 45 S 40, Nenndrehmoment: 40 Nm) angetrieben. Oberhalb des Joches sind zwei feststehende Muttern angebracht, die das Joch durch die Drehung der Gewindestangen nach unten auf die zwischen den Lasteinleitungsplatten liegende Probe pressen. Zur Synchronisierung sind die Motoren über eine Kette miteinander verbunden.

Beschreibung der Kraftmessung: Die Kraft wird über einen Kraftsensor (Typ ME KM38), der zwischen der oberen Lasteinleitungsplatte und dem Joch platziert ist, gemessen.
Beschreibung der Wegmessung: Die Wegmessung erfolgt über die Umdrehung der Gewindestangen. Diese wird über ein Zahnrad abgenommen, das wiederum ein Zahnrad treibt, welches mit einer Taktscheibe verbunden ist. Die Bewegung dieser Scheibe wird durch eine Lichtschranke (Typ Sharp GP 1 A 71R) aufgenommen. Die maximale Auflösung beträgt 0,05 mm.
Beschreibung der Speicher programmierbaren Steuerung (SPS): Bei der SPS handelt es sich um eine Entwicklung von Jonathan Blanz und des Verfassers speziell für diesen Prüfstand.
Sie basiert auf der C-Control M-Unit 2.0, (max. 20.000 Instruktionen/s, 10 kByte Programmspeicher, 8 A/D-, 24 I/O-Ports)
Die Verstärkung der Signale der Kraftmessdose wird über einen INA 141 Präzisionsinstrumentenverstärker mit einstellbarem Offset und Gain realisiert. Die A/D-Wandlung erfolgt über einen der 8-Bit-Wandler der C-Control M-Unit. Referenz- und Versorgungsspannung von 5,0 Volt werden über einen Präzisions-Low-Drop-Spannungsregler (Typ, LT 1086-5 CT, Spannungskonstanz 0,015%) bereitgestellt. Die Programmierung und Bedienung erfolgt über ein USB-Interface mit einem PC sowie über ein externes Tastermodul.

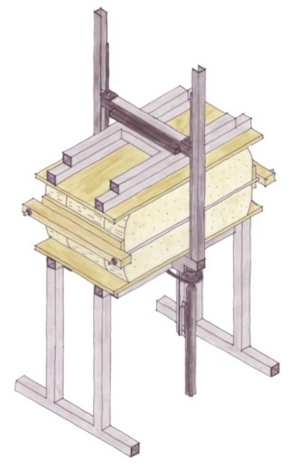


Abbildung 4.2: HD-Kombiprüfstand

4.3.2.2 Q-Ballen Kombiprüfstände

Die Versuche mit den Proben 1.6.1.1-1.6.1.3 wurden mit dem im Rahmen dieser Dissertation entwickelten Kombiprüfstand durchgeführt. Da erheblich mehr Tests geplant waren, wurden 2 identische Q-Ballen Prüfstände gebaut. Mit den Q-Ballen Kombiprüfständen können unter Verwendung der aktuellen Softwareversion der SPS Spannungs-Stauchungs- und Relaxationstests durchgeführt werden. Eine

Programmerweiterung durch Routinen für Kriechtests ist implementierbar.
Jeder Prüfstand verfügt über einen pneumatisch-hydraulischen Antrieb. Dieser wird über eine Speicher programmierbare Steuerung (SPS), die auch als Datenlogger eingesetzt wird, in Verbindung mit einer Kraftmessdose und zwei Wegmessern angesteuert.

Beschreibung des Prüfstandes: Im Wesentlichen besteht der Prüfstand aus der unteren und der oberen Lasteinleitungsplatte und einer Rahmenkonstruktion, über welche die beiden Platten mittels eines pneumatisch-hydraulischen Stempels zusammengepresst werden können. Der Antrieb der Stempel erfolgt über Druckluft, die einen Kolben in einem Hilfszylinder bewegt, welcher Hydrauliköl in den Arbeitszylinder drückt und so den Stempel ausfährt. Dieser Antrieb ist auf einem Hilfsjoch über der oberen Lasteinleitungskonstruktion gelagert und presst diese gegen ein Joch, welches, in U-Profilen geführt, durch Gewindestangen mit der unteren Lasteinleitungskonstruktion verbunden ist. Der maximale Hub des Stempels beträgt 14 cm. Sind diese erreicht, wird die obere Lasteinleitungsplatte über das Hilfsjoch und die Gewindestangen arretiert, das Hauptjoch durch Einfahren des Stempels entlastet, abgesenkt und entsprechend tiefer arretiert. Der Versuch kann nun durch erneutes Ausfahren des Stempels fortgesetzt werden. Tests ergaben, dass sich die Lasteinleitungsplatten unter Belastung durchbiegen. Die Wegmesser zeigen bei einer Spannung von 40 kN/m² 18,7 mm weniger Strecke an als tatsächlich zurückgelegt wurde. Dies wird bei der Auswertung der Messergebnisse berücksichtigt.
Beschreibung der Kraftmessung: Die Kraft wird über einen Kraftsensor (Typ Global Weighing PR 6051/00S), der zwischen dem Hydraulikstempel und dem Hauptjoch platziert ist, gemessen.
Beschreibung der Wegmessung: Die Wegmessung erfolgt über eine Taktscheibe, deren Bewegung von einer Lichtschranke abgetastet wird. Angetrieben wird die Taktscheibe über eine Kette, die eine Verbindung zwischen oberer und unterer Lasteinleitungskonstruktion herstellt. Die maximale Auflösung beträgt 0,1 mm.
Beschreibung der Speicher programmierbaren Steuerung (SPS): Bei der SPS handelt es sich um eine Entwicklung von Jonathan Blanz und Benjamin Krick speziell für diesen Prüfstand. Sie basiert auf einem PIC-Prozessor, der über einen 10-Bit A/D-Wandler verfügt, welcher eine höhere Abtastgenauigkeit ermöglicht als die beim HD-Kombiprüfstand eingesetzte C-Control Unit. Die Verstärkung der Signale der Kraftmessdose wird über einen INA 141 Präzisions- instrumentenverstärker mit einstellbarem Offset und Gain realisiert. Referenz- und Versorgungsspannung von 5,0 Volt werden über einen Präzisions-Low-Drop-Spannungsregler (Typ, LT 1086-5 CT, Spannungskonstanz 0,015%) bereitgestellt. Die Programmierung und Bedienung erfolgt über ein USB-Interface mit einem PC sowie über Taster im Gehäuse der SPS.

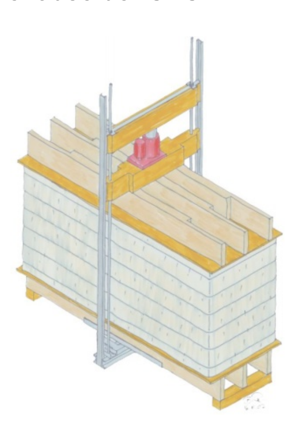


Abbildung 4.3: Q-Ballen Kombiprüfstand

4.3.3 Relaxationsprüfstände

Für die Relaxationstests mit der Probenreihe 1.3 wurden im Rahmen dieser Dissertation Relaxationsprüfstände entwickelt und verwendet.
Die Prüfstände bestehen im Wesentlichen aus einer Halterung für die zu prüfenden Strohballen, sowie einem Ober- und Unterjoch, welche die Ballen über Gewindestangen zusammenpressen. Zwischen Oberjoch und oberer Lasteinleitungsplatte befindet sich eine Kraftmessdose zur Messung der aktuell wirkenden Kraft. In Längsrichtung wird der Strohballen durch Lasteinleitungselemente und Gewindestangen in seiner Länge fixiert (seitliche Einspannung). Während bei den ersten Tests ein einfacher Messverstärker, der manuell in zeitlich größer werdenden Abständen abgelesen wurde, zur Anwendung kam, wurden bei den späteren Versuchen im Rahmen dieser Dissertation entwickelte Datenlogger eingesetzt, welche die Spannungswerte von je drei Relaxationsprüfständen alle 12 Stunden über in der Regel einen Monat aufzeichneten. Wie die im HD-Ballen Kombiprüfstand eingesetzte SPS basiert auch dieser Datenlogger auf der C-Control Unit 2.0. Zur Kraftmessung kamen folgende Sensoren zum Einsatz: Typ Global Weighing PR 6051/00S (Prüfstand Generation 1), ME KM38 (Prüfstand Generation 2)

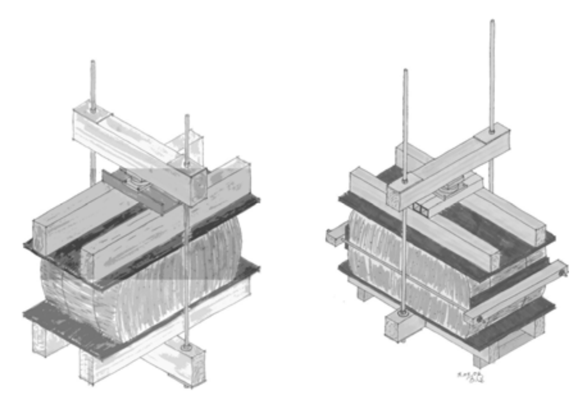


Abbildung 4.4: Relaxationsprüfstände der ersten und zweiten Generation

4.3.4 Kriechprüfstand

Der im Rahmen dieser Dissertation vom Verfasser entwickelte Kriechprüfstand wurde für die Testreihe Proben 1.2.0.1-1.2.4.2, insgesamt 16 Proben, verwendet.
Er besteht im Wesentlichen aus einer Halterung, welche den zu testenden Strohballen aufnimmt und einem Hebel, der auf der einen Seite fixiert, auf der anderen mit einem variablen Gewicht beaufschlagt, den Strohballen in seiner Halterung unter Spannung setzt. Zwischen dem Hebelarm und der oberen Lasteinleitungsplatte befindet sich ein Kraftsensor (Typ Global Weighing PR 6051/00S) zur Messung der aktuell wirkenden Kraft. In Längsrichtung wird der Strohballen durch Lasteinleitungselemente und Gewindestangen in seiner Länge fixiert (seitliche Einspannung).
Die Wegmessung erfolgte bei den Proben 1.2.0.1-1.2.2.3 manuell mittels einer Schieblehre (siehe 1.1.1), bei den Proben 1.2.2.4-1.2.4.2 mittels einer Wegmessung, welche dem unter 4.3.2.2 beschriebenen System entspricht.

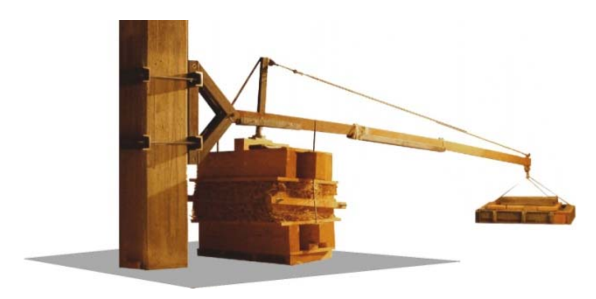


Abbildung 4.5: Kriechprüfstand

4.3.5 Wandprüfstände

4.3.5.1 Wandprüfstand 1

Der Wandprüfstand 1 besteht aus oberer und unterer Lasteinleitungsplatte (jeweils 3 m lang und 0,5 m breit), welche über ein System aus Jochen und Hilfsjochen sowie variabel einstellbaren Stahlbändern über einen pneumatisch-hydraulischen Antrieb zusammen gepresst werden können. Dieser Prüfstand ist zum Aufbringen von Kräften bis zu 45 kN geeignet. Er wurde im Rahmen dieser Dissertation entwickelt und für die Wandtests 1-4 verwendet. Zur Wegmessung wurden Maßbänder mit Millimeterteilung verwendet. Die Kraft- und Relaxationsmessung erfolgte wie in 4.3.3 beschrieben.



Abbildung 4.6: Wandprüfstand 1

4.3.5.2 Wandprüfstand 2

Der Wandprüfstand 2 stellt eine Weiterentwicklung des Wandprüfstandes 1 dar. Anders als bei diesem wird die aufgebrachte Kraft von stabilen Stahlrahmen aufgenommen. Wandprüfstand 2 erlaubt auch das Aufbringen von Horizontallasten. Mit diesem Wandprüfstand wurden die Wandtests 5-8 durchgeführt. Bei den Wandtests 5 und 6 erfolgte die Messung wie unter 4.3.5.1 beschrieben, bei den Wandtests 7 und 8 wie unter 4.3.2.2 dargestellt.

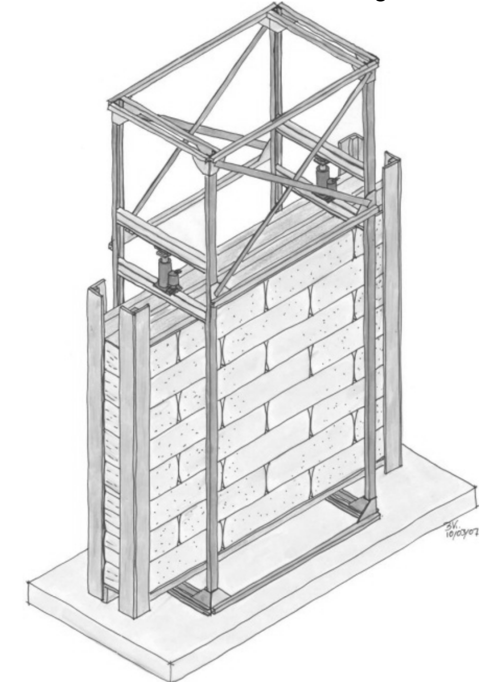


Abbildung 4.7: Wandprüfstand 2

4.4 *Weitere Messinstrumente*

4.4.1 Hygrometer/Thermometer

Zur Messung der relativen Luftfeuchte und Temperatur im Ballen wurde ein Fernsensor-Hygrothermometer des Herstellers Extech (Modellnummer 448515) verwendet.
Das Messgerät wurde mittels Exsikkatorlösungen abgeglichen. Dabei wurde festgestellt, dass das Gerät in einem Feuchtebereich über 60% rH hinreichend genaue Werte (3,1% maximale Abweichung bei der Messung der relativen Luftfeuchte, 6% bei der Messung der Temperatur) liefert.

4.4.2 Gewichtsmessung

- Für die grammgenaue Gewichtsbestimmung der Proben 1.4.1.1-1.4.13.1, die Timo Struwe im Rahmen seiner Diplomarbeit (Struwe 2007) durchführte, wurde eine Digitale Plattformwaage des Herstellers Sartorius verwendet (Typ MC 1 Industry IC 34000P).
- Für alle anderen Gewichtsbestimmungen an HD-Kleinballen kam eine digitale Plattformwaage des Herstellers Soehnle (Typ 2710) zur Anwendung.
- Für die Gewichtsbestimmung von Quaderballen kam eine Uhrwaage der Firma Hahn&Kolb Stuttgart mit einer Nennlast von 300 kg zum Einsatz.

4.4.3 Längenmessung

- Die Abmessungen der Ballen wurden mit einer millimetergenauen Schieblehre, welche im Rahmen dieser Dissertation konstruiert wurde, bestimmt
- Für die Messungen zur Wiederausdehnung kam ein Gliedermaßstab zum Einsatz
- Zur Messung des Kriechens und zum Justieren von Prüfständen kam eine 1/100stel mm genaue digitale Schieblehre, Messbereich 0-300 mm der Marke PROFITEXX, zum Einsatz.

5 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Versuchsergebnisse werden in Anhang II.2, *Darstellung der Versuchsergebnisse zum elastomechanischen Verhalten von Strohballen und Wänden aus Strohballen*, dargestellt.

5.1 Prinzipielle Betrachtungen zum Spannungs-Stauchungs- verhalten von Einzelballen

Die Ergebnisse der in dieser Arbeit vorgenommenen Untersuchungen bestätigen das Spannungs-Stauchungsverhalten von Einzelballen, wie es unter 2.1 beschrieben wird. Zhang (2004) (siehe Anhang II.1) identifizierte vier Phasen im Verlauf der Spannungs-Stauchungskurve. Diese Phasen werden im Prinzip durch die beschriebenen Versuche mit flach und hochkant liegenden unverputzten Ballen bestätigt. Im schwerpunktmäßig untersuchten Spannungsbereich bis 40 kN/m² können folgende Phasen identifiziert werden, wobei das prinzipielle Verhalten bei allen untersuchten Stroharten und Halmorientierungen gleich ist, jedoch erhebliche Variationen in der Lokalisierung der einzelnen Phasen beobachtet wurden (siehe auch Abbildung 5.1):

1. „Aussteifen" der Proben: Anstieg der Steigung der Verformungskennlinie
2. Linearer Bereich: Konstante Steigung. In einigen Fällen endet dieser Bereich nicht im untersuchten Spannungsbereich
3. a. Weiteres „Aussteifen" der Proben: Erneuter Anstieg der Steigung der Verformungskennlinie (hauptsächlich bei sehr dichten, unverzerrten, flach liegenden Ballen).
   b. Abknicken der Kennlinie, verursacht durch eine Winkelverzerrung des Ballens während des Tests (besonders bei hochkant liegenden Ballen geringer Dichte).

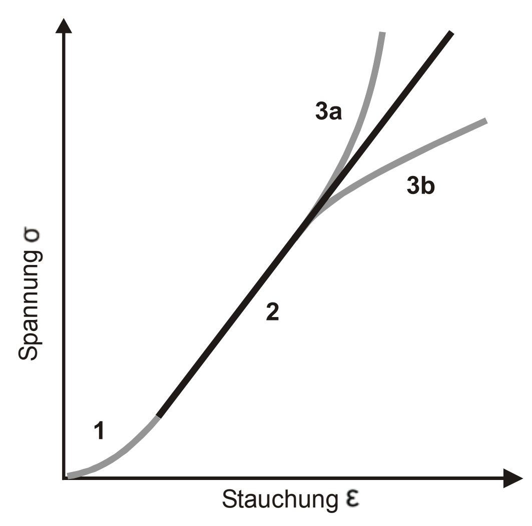


Abbildung 5.1: Prinzipieller Verlauf der Kennlinien der untersuchten unverputzten Proben

Phase 2 stellt dabei den ungestörten, linearen Bereich nach dem Aussteifen dar, der dem Elastizitätsmodul nach DIN EN 826 entspricht. Während flach liegende Ballen zu einer deutlichen Querdehnung und einem „Ausbeulen" der Ballen (1.2 in Abbildung 5.2) neigen, welches wirksam durch die beschriebene Einspannung verhindert werden konnte, knicken hochkant liegende Ballen in ihrer Längsachse aus (2.2 in Abbildung 5.3) und spreizen sich zudem an den Ballenkanten auf (2.3 in Abbildung 5.3). Dieser Effekt erhöht die Wahrscheinlichkeit einer Winkelverzerrung bei hochkant liegenden Ballen deutlich (2.4 in Abbildung 5.3). Das Ausknicken konnte durch die seitliche Arretierung der Ballen zufrieden stellend verhindert werden, das Aufspreizen jedoch nicht.

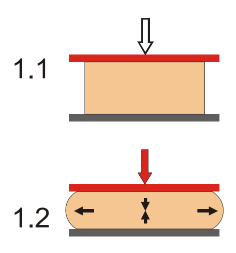


Abbildung 5.2: Verformung nicht eingespannter, flach liegender Ballen unter Last

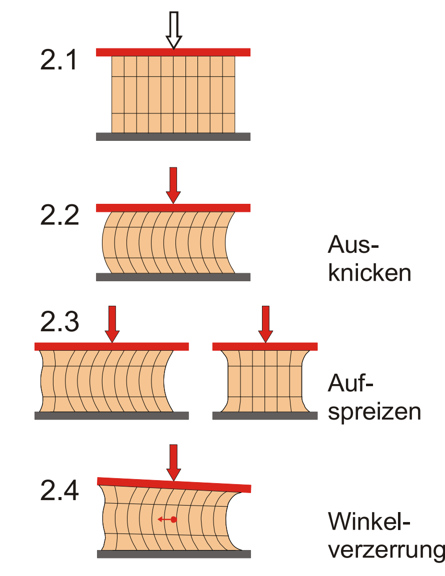


Abbildung 5.3: Verformung nicht eingespannter, hochkant liegender Ballen unter Last

Im Gegensatz zu spröden, mineralischen Baustoffen wie Ziegel oder Beton, die zunächst eine lineare Verformung aufweisen und dann plötzlich durch Sprödbruch kollabieren, weisen unverputzte Strohballen unabhängig von der Halmlage ein mehr oder minder ausgeprägtes duktiles Verhalten auf (siehe Abschnitt 1.1), bei dem sich die Steilheit der Verformungskennlinie im Anschluss an die Hooksche Gerade erhöht. Allerdings ist im Gegensatz zum klassischen duktilen Verhalten keine Fließgrenze erkennbar.

Übertragen auf ein Gebäude bedeutet dieser Effekt, dass bei steigender Last kein Versagen der (lasttragenden) Strohballenkonstruktion eintritt, sondern die Formänderung mit steigender Last abnimmt (unter der Bedingung, dass die Wände nicht ausknicken) Dieser Effekt kann sich positiv auf künftige Sicherheitsbeiwerte für lasttragende Strohballenkonstruktionen auswirken.

5.2 *Einflüsse auf das Spannungs-Stauchungsverhalten von Einzelballen unter Kurzzeitbelastung*

5.2.1 Einfluss der Halmorientierung bei nicht eingespannten HD-Weizenballen

Verglichen werden die über je drei Proben gemittelten Spannungs-Stauchungs-Kennlinien von flach und hochkant liegenden sowie stehenden unverputzten HD-Weizenballen (Hochdruck-Kleinballen aus Weizenstroh) ohne seitliche Einspannung. Relevante Werte können der
Tabelle 5.1 entnommen werden.

Abbildung 5.4 zeigt deutlich, dass die hochkant liegenden Ballen trotz niedrigerer Dichte eine geringere Stauchung aufweisen, als die flach liegenden Ballen. Die stehenden Ballen haben einen deutlich geringeren E-Modul, die Kennlinie verläuft entsprechend flacher als bei den liegenden Ballen. Dieser Effekt kann nicht nur durch die geringere Dichte erklärt werden, sondern zum überwiegenden Teil durch die abweichende Geometrie. Aufgrund der Lage der Schnürung ergibt sich eine höhere Querdehnung der Ballen, aus der eine größere Stauchung resultiert.

Die Ergebnisse dieser Testreihe sprechen für die Verwendung hochkant liegender Ballen in lasttragenden Strohballengebäuden.

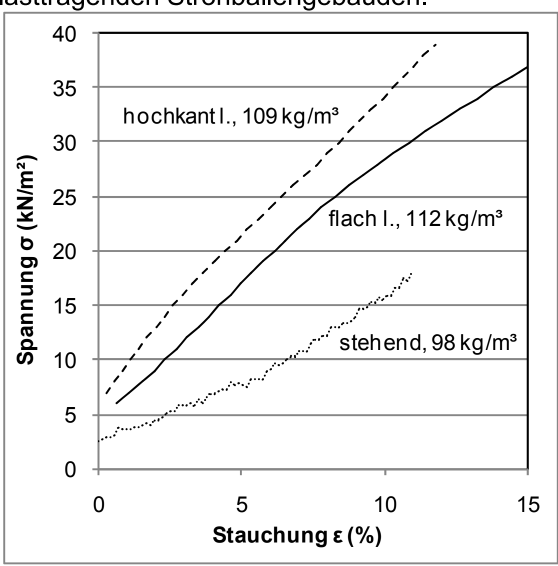


Abbildung 5.4: Vergleich der Spannungs-Stauchungskennlinien flach und hochkant liegender sowie stehender, unverputzter, nicht eingespannter HD-Weizenballen

Tabelle 5.1: Mittelwerte flach und hochkant liegender unverputzter HD-Weizenballen ohne Einsp. (Auswahl)

Ausrichtung	ρ_{tr} (kg/m³)	ε_p (%)	E-Modul kN/m²	Trockendichte-bereich (kg/m³)	Proben Nummern	Proben Anzahl
Ø flach. l.	112,07	-1,78	258,33	107-117	1.1.1.4-1.1.1.6	3
Ø hochk. l.	109,28	-3,50	256,44	102-113	1.1.2.4-1.1.2.6	3
Ø stehend	98,46	0,94	172,43	91-106	1.5.3.1-1.5.3.3	3
ρ_{tr}: Trockendichte; ε_p: Nullpunktverschiebung; Ø Mittelwert aus den betreffenden Werten						

5.2.2 Einfluss der Halmorientierung bei seitlich eingespannten HD-Weizenballen

Verglichen werden die über je drei Proben gemittelten Spannungs-Stauchungs-Kennlinien von flach und hochkant liegenden unverputzten HD-Weizenballen mit seitlicher Einspannung. Relevante Werte können der Tabelle 5.2 entnommen werden.
Abbildung 5.5 zeigt bei nahezu identischen durchschnittlichen Trockendichten, dass die Kennlinie der hochkant liegenden Ballen steiler verläuft, als die der flach liegenden Ballen. Beide Kennlinien verlaufen ab einer einer Spannung von ca. 6 kN/m² nahezu linear. Der E-Modul der hochkant liegenden Weizenballen liegt mehr als 100 kN/m² über dem der flach liegenden Ballen. Der Unterschied bei der Nullpunktverschiebung ist marginal. Wie bei den nicht eingespannten Ballen sprechen die Ergebnisse auch dieser Testreihe für die Verwendung von hochkant liegenden Ballen in lasttragenden Strohballenkonstruktionen.

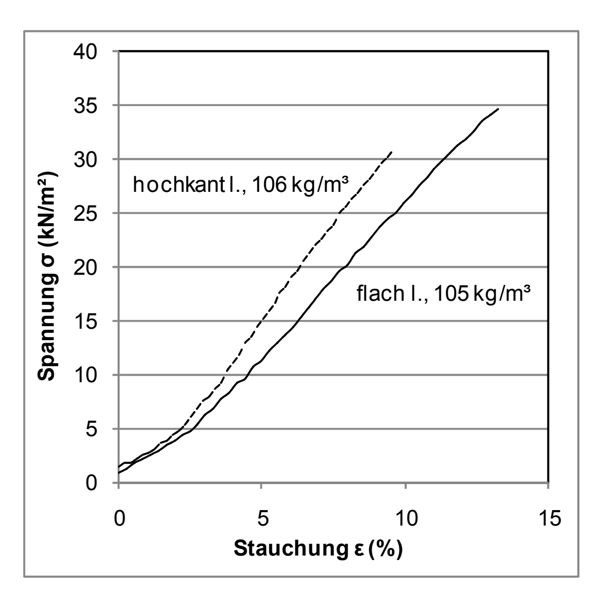


Abbildung 5.5: Vergleich der Spannungs-Stauchungskennlinien flach und hochkant liegender unverputzter HD-Weizenballen mit seitlicher Einspannung

Tabelle 5.2: Mittelwerte (Auswahl) flach und hochkant liegender unverputzter HD-Weizenballen ohne Einspannung

Ausrichtung	ρ_{tr} (kg/m³)	ε_p (%)	E-Modul kN/m²	Trockendichte-bereich (kg/m³)	Proben Nummern	Proben Anzahl
Ø flach. l.	105,20	1,05	298,27	102,50-110,87	1.1.4.1-1.1.4.3, 1.4.1.1, 1.5.8.1	5
Ø hochk. l.	105,68	0,83	404,01	102,07-109,85	1.1.3.2, 1.4.9.3, 1.5.2.1, 1.5.2.2, 1.5.9.1	5
ρ_{tr}: Trockendichte; ε_p: Nullpunktverschiebung; Ø Mittelwert aus den betreffenden Werten						

5.2.3 Einfluss der seitlichen Einspannung bei flach und hochkant liegenden HD-Weizenballen

Die E-Module der eingespannten Ballen beider Gruppen sind höher als die entsprechenden E-Module der nicht eingespannten Ballen. Der Verformungsnullpunkt der nicht eingespannten Ballen liegt im negativen Bereich. Aus diesem Grund ist die Verformung der eingespannten hochkant liegenden Ballen über den gesamten dargestellten Bereich trotz eines höheren E-Moduls niedriger als bei den nicht eingespannten Ballen. Bei den flach liegenden Ballen ist dies über weite Teile des Messbereiches der Fall, siehe Abbildung 5.6. Die Unterschiede im Verformungsnullpunkt zwischen den Ballengruppen resultieren vermutlich aus den verschiedenen Testsetups.
Während der E-Modul der seitlich eingespannten, flach liegenden Ballen nur wenig höher ist als der E-Modul der nicht eingespannten flach liegenden Ballen ist der Unterschied bei eingespannten und nicht eingespannten hochkant liegenden Ballen wesentlich.

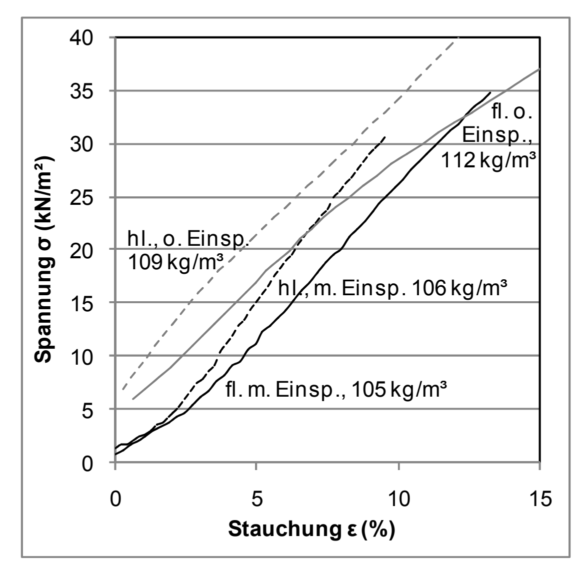


Abbildung 5.6: Vergleich der Spannungs-Stauchungs-Kennlinien flach und hochkant liegender unverputzter HD-Weizenballen mit und ohne seitl. Einspannung

5.2.4 Diskussion zum Einfluss der Halmorientierung und der seitlichen Einspannung bei HD-Weizenballen

Stellt man sich die Strohballen als eine Ansammlung geordnet liegender Rohre vor, die entweder in Belastungsrichtung liegen (flach liegend) (1 in Abbildung 5.7) oder in Belastungsrichtung stehen (hochkant liegend) (3 in Abbildung 5.7), so wird evident, dass sich die liegenden Rohre leichter zusammendrücken lassen als die stehenden (2 in Abbildung 5.7). Bei weiterer Betrachtung wird augenfällig, dass die stehenden Rohre anfälliger gegen Knicken sind als die liegenden (4). Es überlagern sich also zwei Effekte: 1. Liegende Rohre sind weniger steif (2), 2. Stehende Rohre knicken aus (4).
Bei den Ballen ohne Einspannung scheinen sich diese beiden Effekte die Waage zu halten. Die E-Module der flach- und hochkant liegenden Proben sind nahezu identisch. Die seitlich eingespannten hochkant liegenden Ballen (5) haben jedoch einen deutlich höheren E-Modul als die flach liegenden eingespannten Ballen. Die Einspannung verhindert bzw. verzögert also das Ausknicken der Rohre in den hochkant liegenden Ballen (5). Die Einspannung ist bei hochkant liegenden Ballen effektiver als bei flach liegenden Ballen.

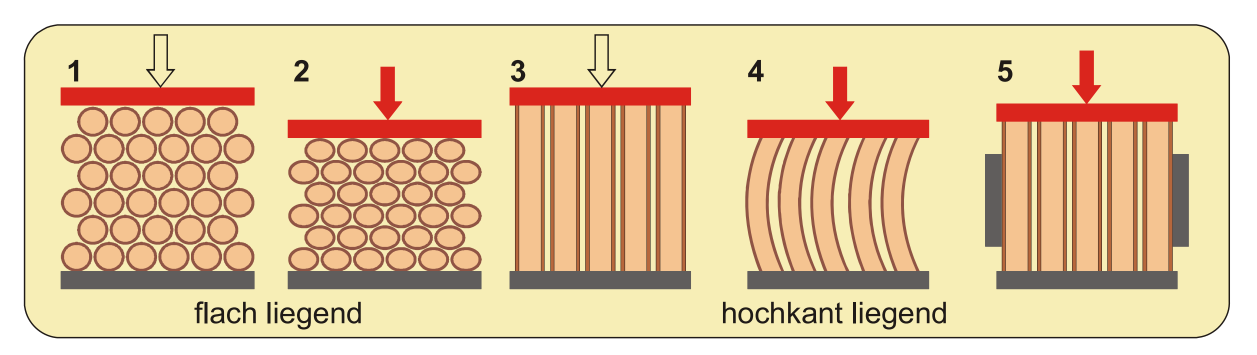


Abbildung 5.7: Verhalten von flach und hochkant liegenden HD-Ballen mit und ohne Einspannung

5.2.5 Einfluss der Ballentrockendichte bei seitlich eingespannten, flach und hochkant liegenden HD-Weizenballen

Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Trockendichte
In Abbildung 5.8 sind die Elastizitätsmodule der in Anhang II.2, Kapitel 2.1.2 und 2.2.2 beschriebenen HD-Weizenballen in Abhängigkeit von ihrer Trockendichte aufgetragen. Es ist sichtbar, dass dichtere Ballen in der Tendenz höhere E-Module aufweisen. Bei den hochkant liegenden Ballen ist diese Tendenz stärker ausgeprägt. Die Datenreihen wurden mit dem Programm Microsoft Excel analysiert und mit Gleichungen beschrieben. Die besten Ergebnisse wurden bei beiden Orientierungen mit Exponentialgleichungen erzielt. Die jeweiligen Gleichungen gelten nur für den entsprechenden Dichtebereich.
Zur Berechnung des Elastizitätsmodules in Abhängigkeit von der Dichte wurden folgende Gleichungen ermittelt:

Flach liegende HD-Weizenballen mit seitlicher Einspannung, Dichtebereich zwischen 90 und 110 kg/m³ (R^2= 0,384):

$$E_{FL} = 134{,}1222 \cdot e^{0{,}0077\,\rho_{tr}}$$

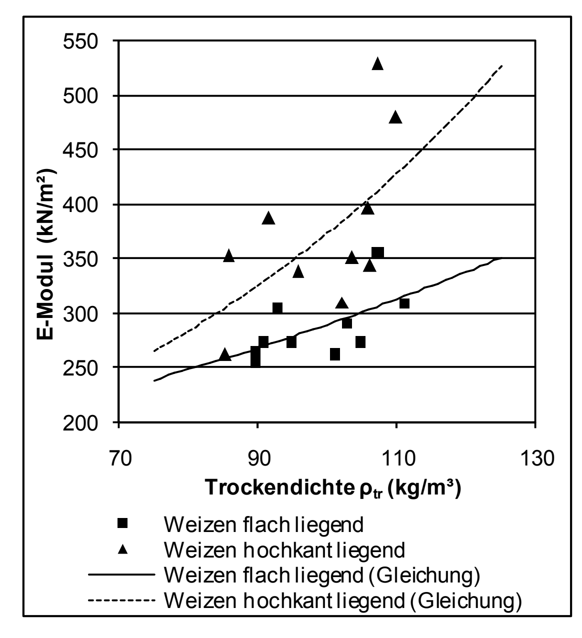


Abbildung 5.8: Elastizitätsmodul von flach und hochkant liegenden HD-Weizenballen mit seitlicher Einspannung in Abhängigkeit von der Trockendichte

Dabei ist:
E_{FL}: E-Modul nach DIN EN 826 für flach liegende Ballen (kN/m²)
e: Eulersche Zahl (2,71828…)
ρ_{tr}: Trockendichte (kg/m³)

Hochkant liegende HD-Weizenballen mit seitlicher Einspannung, Dichtebereich zwischen 85 und 110 kg/m³ (R^2= 0,584)

$$E_{HL} = 94{,}9477 \cdot e^{0{,}0137\,\rho_{tr}}$$

Dabei ist:
E_{HL}: E-Modul nach DIN EN 826 für hochkant liegende Ballen (kN/m²)
ρ_{tr}: Trockendichte (kg/m³)
e: Eulersche Zahl (2,71828…)

Damit ist nachgewiesen, dass eine Abhängigkeit des E-Moduls von der Trockendichte besteht. Obgleich das Bestimmtheitsmaß bei den hochkant liegenden Ballen mit 0,58 höher ist als bei den flach liegenden mit 0,38, ist die Korrelation auch hier schwach.

Nullpunktverschiebung in Abhängigkeit von der Trockendichte
Es konnte kleine Korrelation zwischen Nullpunktverschiebung ε_p und Trockendichte ρ_{tr} ermittelt werden. Um die Nullpunktverschiebung dennoch in die folgenden Berechnungen zur Ermittlung der Stauchung in Abhängigkeit von der Trockendicht ermitteln zu können, wurde das arithmetische Mittel der Nullpunktverschiebungen aus je 10 Proben flach- und hochkant liegender eingespannter HD-Weizenballen gebildet. Diese wird für die folgenden Berechnungen herangezogen.

Für flach liegende eingespannte HD-Weizenballen im Dichtebereich zwischen 90 kg/m³ und 110 kg/m³ wurde eine Nullpunktverschiebung von **ε_{pFL} 1,11%** ermittelt.
Für hochkant liegende eingespannte HD-Weizenballen im Dichtebereich zwischen 85 kg/m³ und 110 kg/m³ wurde eine Nullpunktverschiebung von **ε_{pHL} 1,18%** ermittelt.

Berechnung der Stauchung aus der Trockendichte und der Spannung
In Abschnitt 3.3.5 wurde folgende Gleichung zur Berechnung der Stauchung aus der Nullpunktverschiebung und dem E-Modul entwickelt:

$$\varepsilon(\%) = \varepsilon_p + \frac{\sigma \cdot 100}{E}$$

Dabei ist:
ε: Stauchung (%)
ε_p: Nullpunktverschiebung (%)
σ: Spannung
E: E-Modul nach DIN EN 826 (kN/m²)

Daraus ergeben sich folgende Gleichungen zur Berechnung der Stauchung aus der Spannung und der Trockendichte unter Verwendung der oben gefundenen Gleichungen für seitlich eingespannte, unverputzte HD-Ballen:

Für flach liegende Ballen im Dichtebereich 90-110 kg/m³:

$$\varepsilon_{FL} = 1{,}11 + \frac{\sigma \cdot 100}{134{,}1222 \cdot e^{0{,}0077\rho_{tr}}}$$

Dabei ist:
ε_{FL}: Stauchung flach liegender Ballen (%)
σ: Spannung
e: Eulersche Zahl (2,718…)
ρ_{tr}: Trockendichte (kg/m³)

Bemerkung: Für die Nullpunktverschiebung wurde der wie oben beschriebene Mittelwert der flach liegenden Proben eingesetzt.

Berechnungsbeispiel:
Für einen flach liegenden HD-Weizenballen mit einer Trockendichte von 100 kg/m³ soll die Stauchung bei einer Spannung von 40 kN/m² ermittelt werden.
Es wird in o.g. Gleichung eingesetzt:

$$\varepsilon_{FL} = 1{,}11 + \frac{40kN/m^2 \cdot 100}{134{,}1222 \cdot e^{0{,}0077 \cdot 100kg/m^3}}$$

Es ergibt sich eine Stauchung von ε_{FL}= 14,9%

Für hochkant liegende Ballen im Dichtebereich 85-110 kg/m³:

$$\varepsilon_{HL} = 1{,}18 + \frac{\sigma \cdot 100}{94{,}9477 \cdot e^{0{,}0137 \cdot \rho_{tr}}}$$

Dabei ist:
ε_{HL}: Stauchung flach liegender Ballen (%)

Bemerkung: Für die Nullpunktverschiebung wurde der wie oben beschriebene Mittelwert der flach liegenden Proben eingesetzt.

Berechnungsbeispiel:
Für einen hochkant liegenden HD-Weizenballen mit einer Trockendichte von 100 kg/m³ soll die Stauchung bei einer Spannung von 40 kN/m² ermittelt werden.
Es wird in o.g. Gleichung eingesetzt:

$$\varepsilon_{HL} = 1{,}18 + \frac{40kN/m^2 \cdot 100}{94{,}9477 \cdot e^{0{,}0137 \cdot 100kg/m^3}}$$

Es ergibt sich eine Stauchung von ε_{HL}= 11,9%

Die oben dargestellten Gleichungen gelten zur Ermittlung der Stauchung von Einzelballen. Zur Ermittlung der Stauchung von Wänden siehe Abschnitt 1.1.1.

5.2.6 Einfluss der Strohart

Es wurden insgesamt acht „Stroh-“arten untersucht. Dabei wurden (außer bei Weizen) zwischen einer und drei Proben je Halmorientierung und „Stroh-“art getestet. Da diese Proben

unterschiedliche Trockendichten aufweisen, deren Bereiche sich teilweise nicht überschneiden, gestaltet sich ein direkter Vergleich schwierig.
Daher werden die mittleren Elastizitätsmodule der verschiedenen Strohsorten zunächst mit Weizenstroh verglichen und dann ein Ranking gebildet. Die Elastizitätsmodule für Weizenstroh werden dabei aus den unter 5.2.5 entwickelten Gleichungen generiert. Aus den Hanf- und Miscanthusproben wurde kein Elastizitätsmodul entwickelt, da bei diesen kein linearer Bereich zu identifizieren war.

Tabelle 5.3 beinhaltet E-Module flach liegender, seitlich eingespannter Ballen auf der Basis von Weizen. Tabelle 5.4 beinhaltet hochkant liegender, seitlich eingespannter Ballen auf der Basis von Weizen.

Im Vergleich der beiden Halmorientierungen fällt die unterschiedliche Positionierung der Strohsorten in der Reihenfolge der E-Module auf. Während die Gerstenproben bei flach liegenden Ballen den niedrigsten durchschnittlichen E-Modul aufweisen, stehen sie bei den hochkant liegenden Ballen an zweiter Stelle. Weizen schneidet bei den hochkant liegenden Ballen am schlechtesten ab, bei den flach liegenden Ballen ist Weizen im Mittelfeld positioniert. Lediglich Dinkelballen belegen bei beiden Orientierungen Spitzenplätze. Bei den flach liegenden Ballen sind die Unterschiede geringer als bei den hochkant liegenden Ballen.

Tabelle 5.3: Vergleich der E-Module von flach liegenden HD-Ballen mit seitlicher Einspannung der unterschiedlichen Stroharten

Strohart	ρ_{tr} (kg/m³)	E-Modul (kN/m²)	Trockendichte-bereich (kg/m³)	Proben Anzahl	E-Modul % auf der Basis von Weizen= 100%	E-Modul % auf der Basis von Weizen= 0%
Ø Gerste	76,8	222	72-89	3	92	-8
Weizen (generiert)	76,8	242	/	/	100	0
Ø Dinkel	82,6	276	81-85	3	109	9
Weizen (generiert)	82,6	253	/	/	100	0
Ø Switchgras	88,0	261	/	1	99	-1
Ø Bohne	88,1	349	87-89	3	132	32
Ø Roggen	88,9	271	84-95	3	102	2
Weizen (generiert)	88,9	265	/	/	100	0
ρ_{tr}: Trockendichte; Ø Mittelwert aus den betreffenden Testergebnissen						

Tabelle 5.4: Vergleich der E-Module von hochkant liegenden HD-Ballen mit seitlicher Einspannung der unterschiedlichen Stroharten

Strohart	ρ_{tr} (kg/m³)	E-Modul kN/m²	Trockendichte-bereich (kg/m³)	Proben Anzahl	E-Modul % auf der Basis von Weizen= 100%	E-Modul % auf der Basis von Weizen= 0%
Ø Dinkel	82,2	381	79-86	3	130	30
Weizen (generiert)	82,2	293	/	/	100	0
Ø Roggen	86,0	354	83-88	3	115	15
Weizen (generiert)	86,0	309	/	/	100	0
Ø Gerste	87,9	395	78-96	3	124	24
Weizen (generiert)	87,9	318	/	/	100	0
ρ_{tr}: Trockendichte; Ø Mittelwert aus den betreffenden Testergebnissen						

5.2.7 Einfluss der Ballenart

Neben den bisher diskutierten HD-Kleinballen wurden auch drei Quaderballen untersucht. Diese Quaderballen unterscheiden sich von den HD-Ballen durch ihre Abmessungen (die untersuchten Q-Ballen maßen ca. 0,85x1,2x 2,3 m) und durch die Anzahl der Schnürungen. Folgend werden hochkant liegnde, seitlich eingespannte unverputzte HD-Kleinballen und Quaderballen anhand durchschnittlicher Spannungs-Stauchungskennlinien, Elastizitätsmodule und Nullpunktverschiebungen verglichen, siehe hierzu Abbildung 5.9 und Tabelle 5.5.

Abbildung 5.9 zeigt, dass hochkant liegende Q-Weizenballen einen deutlich höheren Elastizitätsmodul bei gleicher Dichte aufweisen als hochkant liegende HD-Weizenballen. Der Elastizitätsmodul der Q-Ballen liegt um 52,16% höher als der von HD-Ballen.
Dies wird auf die größeren Abmessungen der Q-Ballen zurückgeführt. Es wird vermutet, dass sich die einzelnen Halme in den Q-Ballen besser stabilisieren. Evtl. trägt auch die 6-fache Schnürung (2-fach bei HD-Ballen) zur Stabilisierung bei. Aufgrund der unterschiedlichen Herstellungsweise ist der Anteil an Halmen, die nicht senkrecht zur Belastungsrichtung stehen,

bei Q-Ballen vermutlich höher als bei HD-Ballen.
Dieser Effekt könnte einen besseren Verbund der Halme im Ballen bedingen und so ein seitliches Aufspreizen der Ballen reduzieren. Bei den Q-Ballentests wurde weder ein solches Aufspreizen noch ein Ausknicken bzw. eine Winkelverzerrung beobachtet.

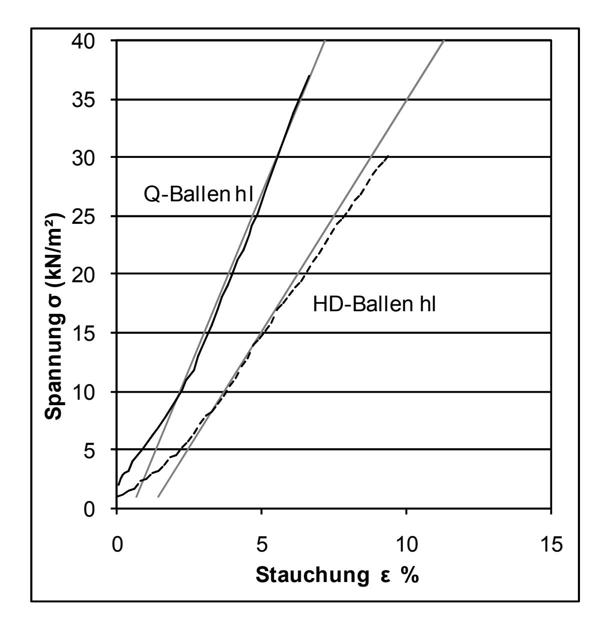


Abbildung 5.9: Vergleich der Elastizitätsmodule und Spannungs-Stauchungs-Kennlinien von HD- und Q-Weizenballen hochkant liegend mit seitlicher Einspannung

Zur Berechnung der Stauchung von unverputzten hochkant liegenden Q-Weizenballen mit seitlicher Einspannung aus der Trockendichte und der Spannung wird folgende Gleichung vorgeschlagen, die auf der Gleichung für HD-Ballen basiert. Sie wurde modifiziert durch das Ersetzen der Nullpunktverschiebung der HD-Ballen gegen die der Q-Ballen und durch das Einfügen eines Faktors zur Berücksichtigung des um 52,16% höheren E-Moduls der Q-Ballen.

$$\varepsilon_{QHL} = 0{,}54 + \frac{\sigma \cdot 100}{94{,}9477 \cdot e^{0{,}0137 \cdot \rho_{tr}}} \cdot 0{,}5216$$

Dabei ist:

ε_{QHL}: Stauchung hochkant liegender Q-Ballen (%)
σ: Spannung
e: Eulersche Zahl (2,718…)
ρ_{tr}: Trockendichte (kg/m³)

Berechnungsbeispiel:
Für einen hochkant liegenden Q-Weizenballen mit einer Trockendichte von 100 kg/m³ soll die Stauchung bei einer Spannung von 40 kN/m² ermittelt werden.
Es wird in o.g. Gleichung eingesetzt:

$$\varepsilon_{QHL} = 0{,}54 + \frac{40 kN/m^2 \cdot 100}{94{,}9477 \cdot e^{0{,}0137 \cdot 100 kg/m^3}} \cdot 0{,}5216$$

Es ergibt sich eine Stauchung von ε_{HL}= 6,12%

Tabelle 5.5: Mittlere E-Module, Trockendichten und Nullpunktverschiebung von Q-Weizenballen im Vergleich mit HD-Weizenballen

Ballenart	ρ_{tr} (kg/m³)	E-Modul kN/m²	ε_p (%)	Trockendichtebereich (kg/m³)	Proben Anzahl	E-Modul % von Weizen -100
Ø Q-Weizenballen	104	600	0,54	103-105	3[1]	52
Ø HD-Weizenballen	101	392	1,38	91-110	3[2]	-1
HD-Weizen (generiert)	104	394	1,18	/	/	0

ρ_{tr}: Trockendichte; ε_p: Nullpunktverschiebung; Ø Mittelwert aus den betreffenden Testergebnissen; [1]: Proben 1.6.1.1-1.6.1.3; [2]: Proben 1.1.3.2, 1.4.9.1, 1.5.2.2

5.2.8 Vergleich des Verhaltens von halbierten und ganzen Strohballen

In den Testreihen 1.4.16-18 wurden halbierte und halbierte zusammengesetzte Ballen auf ihr Spannungs-Stauchungsverhalten hin untersucht. Es sollte die Frage geklärt werden, ob bei Wänden aus hochkant liegenden Ballen die Halme der übereinander liegenden Ballen „ineinander rutschen“ und wie dem gegebenenfalls entgegen zu wirken ist.
Dazu wurden 5 Ballen in der Mitte zwischen den Ballenschnürungen geteilt. Die beiden Hälften des ersten Strohballens wurden in zwei getrennten Versuchen getestet um zu erfahren, ob sich die geteilten Ballen prinzipiell anders verhalten als ungeteilte Ballen. Die beiden Hälften von Ballen 2 und 3 wurden je mit der Schnittseite aufeinander gelegt und getestet, mit Ballen 4 und 5 wurde analog verfahren, jedoch wurde zwischen die Ballenhälften ein dünnes Stahlblech eingelegt, um ein ineinander Gleiten der Halme der beiden Hälften auszuschließen. Die genaue Testbeschreibung ist unter 3.4.2 nachzulesen.
Aus Abbildung 5.10 und Tabelle 5.6 ist ersichtlich, dass sich ein Teilen der Ballen in jedem Fall negativ auf den Elastizitätsmodul auswirkt. Dies kann mit einem verstärkten seitlichen Aufspreizen der Ballen begründet werden, welches im Testverlauf beobachtet wurde.

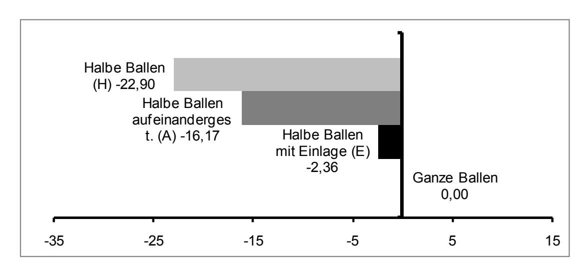


Abbildung 5.10: Vergleich der Elastizitätsmodule halber und zusammengesetzter Ballen mit ganzen Ballen

Dieses Aufspreizen wird durch das Übereinanderlegen (vermutlich durch die erhöhte Reibung von Ballen an Ballen) reduziert. Das befürchtete „Ineinanderrutschen" der Ballenhälften wurde nicht beobachtet. Eine weitere Reduzierung und Stabilisierung erfolgte durch das Einlegen eines Bleches.
Aus den Testergebnissen lässt sich schließen, dass auch Wände aus hochkant liegenden Ballen durch Zwischenlagen stabilisiert werden können.

Tabelle 5.6: Mittlere E-Module, Trockendichten und Nullpunktverschiebung von halbierten HD-Weizenballen im Vergleich mit ganzen HD-Weizenballen

Ballenart	ρ_{tr} (kg/m³)	E-Modul kN/m²	ε_p (%)	Trockendichte-bereich (kg/m³)	Proben Anzahl	E-Modul % von Weizen -100
Ø Halbe (H)	106,52	315,00	0,05	/	2	-22,90
HD-Weizen (generiert)	106,52	408,55	1,18	/	/	0,00
Ø Aufeinandergest. (A)	101,31	317,10	0,22	99-103	2	-16,17
Ø mit Einlage (E)	100,48	369,34	-0,04	07-104	2	-2,36
HD-Weizen (generiert)	100,89	378,26	1,18	/	/	0,00

ρ_{tr}: Trockendichte; ε_p: Nullpunktverschiebung; Ø Mittelwert aus den betreffenden Testergebnissen; H: Probe ist ein halber Ballen A: Probe sind zwei aufeinander gestapelte habe Ballen; E: Probe sind zwei aufeinander gestapelte halbe Ballen mit einer Einlage aus Blech

5.2.9 Vergleich von voll- und partiell belasteten HD-Weizenballen

Bei lasttragenden Strohballenkonstruktionen bildet ein Ringbalken aus Holz bzw. ein verwindungssteifer Kastenträger (Boxbeam) oder eine Leiterkonstruktion den oberen Abschluss der Wand. Besonders bei Konstruktionen aus Quaderballen kann dieser obere Abschluss erhebliche Kosten verursachen, die verringert werden können, wenn der Ringbalken nicht die gesamte Wandbreite überspannt. Aus diesem Grund wurde untersucht, welche Auswirkung eine partielle Belastung auf das Spannungs-Stauchungsverhalten von flach liegenden und hochkant liegenden, eingespannten, unverputzten Einzelballen hat. Es wurde je ein flach und ein hochkant liegender Weizenballen getestet. Dabei betrug die Lasteinleitungsbreite in beiden Fällen 19,8 cm.

Abbildung 5.11 und Tabelle 5.7 zeigen, dass die Elastizitätsmodule partiell belasteter Strohballen unabhängig von der Halmorientierung niedriger sind als diejenigen voll belasteter Ballen. Bei hochkant liegenden Ballen ist dieser Effekt deutlich ausgeprägter als bei flach liegenden Ballen.
Bei den flach liegenden Ballen wird die eingeleitete Last offensichtlich besser verteilt (1 in Abbildung 5.12) als bei hochkant liegenden Ballen (2). Auf Wände übertragen stellt sich der Effekt des geringeren E-Moduls zumindest bei flach liegenden Ballen nur für die oberste Ballenlage ein. Für Wände aus hochkant liegenden Ballen wird eine vollflächige Lasteinleitung empfohlen.

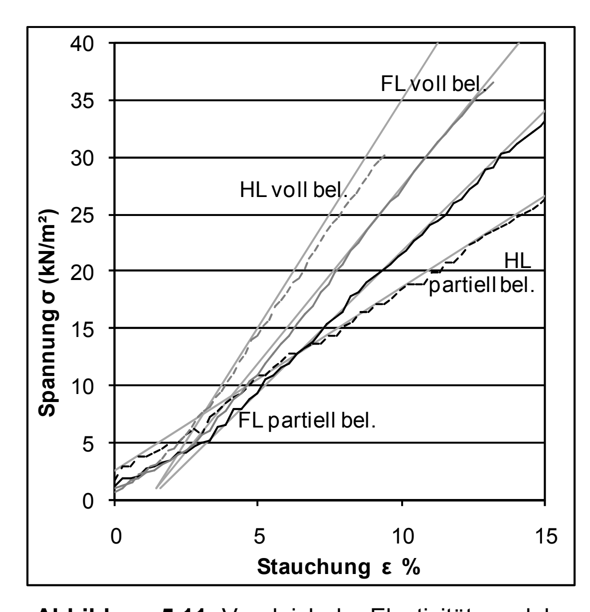


Abbildung 5.11: Vergleich der Elastizitätsmodule und Spannungs-Stauchungs-Kennlinien voll und partiell belasteter flach und hochkant liegender HD-Weizenballen mit seitlicher Einspannung

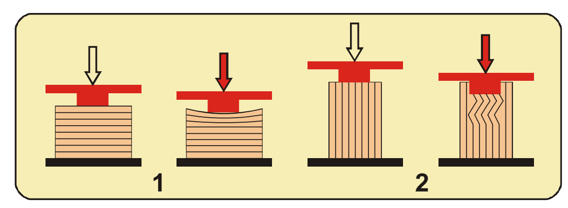


Abbildung 5.12: Verhalten partiell belasteter flach und hochkant liegender Ballen

Tabelle 5.7: E-Module, Trockendichten und Nullpunktverschiebung von partiell belasteten im Vergleich zu voll belasteten HD Weizenballen

Ballenorientierung	**ρ_{tr} (kg/m³)**	**E-Modul kN/m²**	**ε_p (%)**	**Trockendichte-bereich (kg/m³)**	**Proben Anzahl**	**E-Modul % von Weizen -100**
Ø FL teilbelastet	108	246	1,16	/	1: 1.4.14.1	-20
Ø HD-Weizenballen FL	108	312	1,18	105-111	3[1]	1
HD-Weizen (generiert)	108	308	1,11	/	/	0
Ø HL teilbelastet	105	159	1,26	/	1: 1.4.15.1	-60
Ø HD-Weizenballen HL	101	392	1,38	91-110	3[2]	-1
HD-Weizen (generiert)	105	398	1,18	/	/	0

ρ_{tr}: Trockendichte; ε_p: Nullpunktverschiebung; Ø Mittelwert aus den betreffenden Testergebnissen; FL: Probe flach liegend. HD-Weizenballen, unverputzt mit seitlicher Einspannung; HL: Probe hochkant liegend, HD-Weizenballen, unverputzt mit seitlicher Einspannung. [2]: Proben 1.1.3.2, 1.4.9.1, 1.5.2.2

5.2.10 Vergleich von verputzten und unverputzten HD-Weizenballen

Es wurden Spannungs-Stauchungs-Tests mit verputzten Ballen durchgeführt. Dabei wurde zwischen direkter und indirekter Lasteinleitung in den Putz unterschieden. Bei der direkten Lasteinleitung werden die Lasteinleitungsplatten direkt auf den Putz aufgelegt (1 in Abbildung 5.13). Bei indirekter Belastung wird die Last in den Strohballen eingeleitet (2 in Abbildung 5.13).

Die Analyse von Tabelle 5.8 zeigt, dass die hochkant liegenden Strohballen (unabhängig davon ob ein Putz aufgebracht und wie dieser Putz belastet wurde) einen höheren E-Modul aufweisen als die flach liegenden Ballen.

Wird die Last direkt in den Putz eingeleitet, ist der E-Modul am höchsten. Bei hochkant liegenden Weizenballen liegt er mit 7,4 MN/m² über 2000% höher als bei vergleichbaren Ballen ohne Putz (339 kN/m²). Wird die Last indirekt in den Putz eingeleitet, tritt eine höhere Verformung ein als bei direkter Lasteinleitung. Bei den flach liegenden Ballen liegt der E-Modul bei indirekter Lasteinleitung mit 0,9 MN/m² nur um 200% höher als bei den Ballen ohne Putz gleicher Orientierung (318 kN/m²). Die Unterschiede zwischen den E-Modulen von flach liegenden Ballen mit und ohne Putz sind insgesamt kleiner als die Unterschiede bei den hochkant liegenden Proben.

Abbildung 5.14 zeigt zusätzlich die gemessenen bzw. gemittelten Spannungs-Stauchungskennlinien flach liegender unverputzter und verputzter direkt und indirekt belasteter Ballen. Bei Probe 1.5.7.2, bei der die Last direkt in den Putz eingeleitet wurde, brach der Putz bei einer Spannung von ca. 38 kN/m². Dies macht sich in einem Anstieg der Stauchung bei deutlich niedrigerer Spannungszunahme bemerkbar. Der Putz brach direkt unterhalb der Lasteinleitungsplatte (siehe Versagensbild 1 in Abbildung 5.13). Dieses Versagen ist der einzige Bruch eines Putzes bei allen durchgeführten Tests, bei denen die Lasteinleitung direkt erfolgte. Bei allen flach liegenden Ballen, die indirekt belastet wurden, kam es zu mehr oder minder deutlichen Frakturen im Putz (2). Bei allen hochkant liegenden Proben, bei denen der Putz indirekt belastet wurde, drückte sich das Lasteinleitungselement in den Ballen ein, während der Putz nicht mitgestaucht wurde (3). Es erfolgte jedoch kein Bruch des Putzes. Diese Ergebnisse sprechen für eine direkte Lasteinleitung in den Putz.

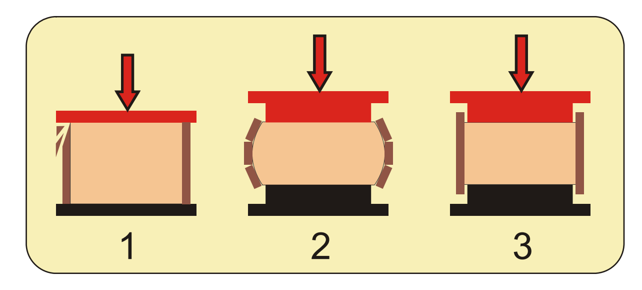


Abbildung 5.13: Beobachtete Versagensarten von verputzten HD-Ballen

Tabelle 5.8: E-Module, Trockendichten und Nullpunktverschiebung von verputzten HD-Weizenballen verschiedener Orientierungen im Vergleich zu unverputzten HD Weizenballen

Ballenorientierung	ρ_{tr} (kg/m³)	E-Modul kN/m²	ε_p (%)	Trockendichte-bereich (kg/m³)	Proben Anzahl	E-Modul % von Weizen -100
Ø FL V D	106	5486	0,55	106-121	3	1701
FL (generiert)	106	304	1,11	/	/	0
Ø FL V I	112	911	0,15	104-109	3	187
FL (generiert)	112	318	1,11	/	/	0
Ø HL V D	93	7418	0,69	83-100	3	2090
HL (generiert)	93	339	1,18	/	/	0
Ø HL V I	84	1292	0,55	/	3	328
HL (generiert)	84	301	1,18	/	/	0

ρ_{tr}: Trockendichte; ε_p: Nullpunktverschiebung; Ø Mittelwert aus den betreffenden Testergebnissen; FL: Probe flach liegend. HD-Weizenballen mit seitlicher Einspannung; HL: Probe hochkant liegend HD-Weizenballen mit seitlicher Einspannung; V: Verputzt; D: Direkte Lasteinleitung in den Putz; I: Indirekte Lasteinleitung in den Putz.

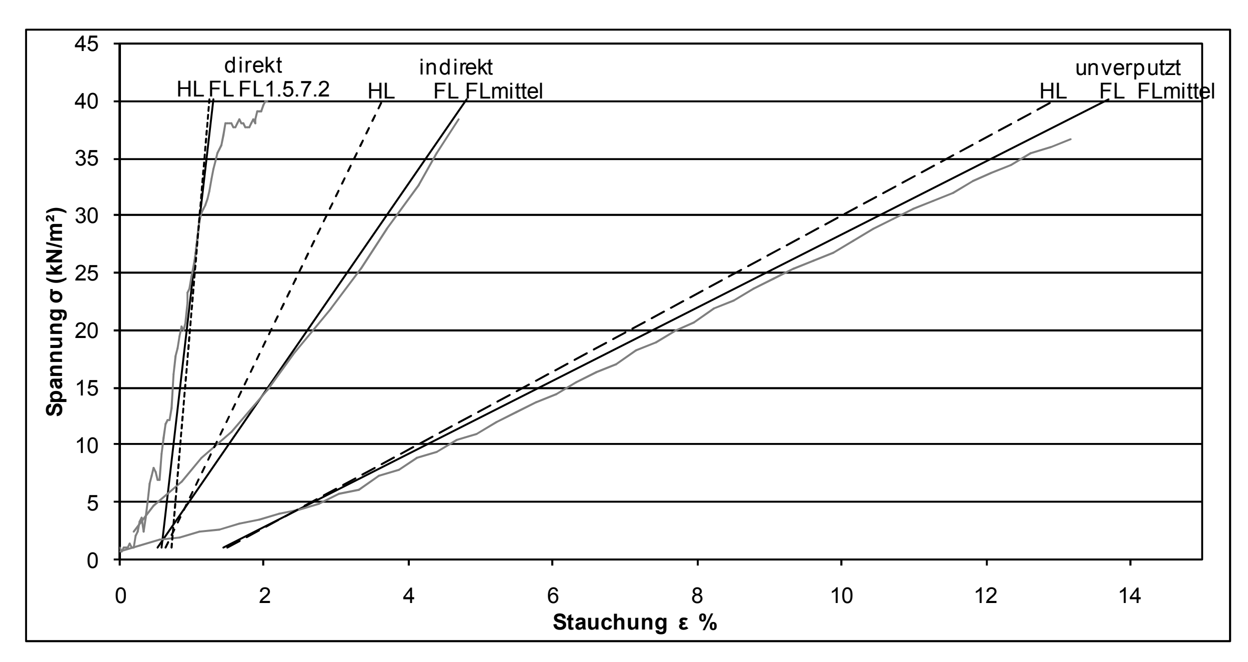


Abbildung 5.14: Vergleich der E-Module und Verformungskennlinien von verputzten und unverputzten HD-Weizenballen

5.2.11 Vergleich mit früheren Untersuchungen

Aufgrund ungenauer Kenntnisse der Details früherer Untersuchungen ist es nicht möglich, quantitative Vergleiche anzustellen. Die folgende Diskussion ist daher rein qualitativ.
In den im Rahmen dieser Dissertation durchgeführten Untersuchungen wurde festgestellt, dass hochkant liegende Ballen (bei Trockendichten ab ca. 70 kg/m³) höhere Elastizitätsmodule aufweisen als flach liegende Ballen. Dies wird durch die Untersuchungen von Zhang (2000, 2002) und Schmidt (2003) bestätigt. Ashour, der mit nicht eingespannten Ballen arbeitete, fand nur marginale Unterschiede. Bei sehr geringen Dichten verhielten sich flach liegende Ballen steifer als hochkant liegende.

Schmidt (2003) testete ebenfalls eingespannte Kleinballen beider Orientierungen. Er kommt dabei zu den gleichen Aussagen, die auch das Ergebnis dieser Dissertation sind: Werden die E-Module von eingespannten und nicht eingespannten Ballen gleicher Orientierung verglichen, wird deutlich, dass die Einspannung bei hochkant liegenden Ballen einen deutlich größeren Effekt auf die Steigerung des Elastizitätsmodules hat als bei flach liegenden Ballen.
Bei Ashour haben Weizenballen in beiden Orientierungen höhere E-Module als Gerstenballen. In der vorliegenden Arbeit ist dies nur bei flach liegenden Ballen der Fall.
Vardy/McDougal (2006) stellten umfangreiche Untersuchungen an verputzten Kleinballen beider Orientierungen an. Für den in der vorliegenden Dissertation betrachteten Spannungsbereich kommen Vardy/McDougal eben-

falls zu dem Ergebnis, dass hochkant liegende Ballen einen höheren Elastizitätsmodul aufweisen als flach liegende Ballen. Vardy/McDougal stellen jedoch fest, dass die Maximallast vor dem Versagen des Putzes bei flach liegenden Ballen im Durchschnitt um 36% höher ist als bei hochkant liegenden Ballen.
Danielewicz/Reinschmidt (2007) führten u. a. Tests an teilbelasteten, flach liegenden Großballen (ohne Einspannung) durch. Auch sie kommen zu dem Ergebnis, dass der E-Modul bei teilbelasteten Ballen geringer ist, sich jedoch eine relativ gute Lastverteilung einstellt.

5.2.12 Zusammenfassung

Bezüglich der Einflüsse auf das Spannungs-Stauchungsverhalten von Kleinballen konnte festgestellt werden:

- Bei eingespannten Strohballen ist die Stauchung bei gleicher Belastung geringer als bei nicht eingespannten Strohballen. Bei hochkant liegenden Strohballen ist dies besonders deutlich (siehe Abschnitt 5.2.3 und 5.2.4).
- Hochkant liegende Strohballen weisen ab einer Rohdichte von ca. 70 kg/m³ einen höheren E-Modul und damit eine geringere Stauchung bei gleicher Spannung auf als flach liegende Strohballen. Bei eingespannten Strohballen sind diesbezüglich die Unterschiede größer als bei nicht eingespannten Strohballen (siehe Abschnitt 5.2.1, 5.2.2 und 5.2.4).
- Es wurde bestätigt, dass dichtere Ballen in der Tendenz höhere E-Module aufweisen. Bei hochkant liegenden Ballen ist der Einfluss der Ballendichte auf den Elastizitätsmodul größer als bei flach liegenden Ballen. Für HD-Weizenballen wurden für beide Orientierungen Gleichungen gefunden, die das Spannungs-Stauchungsverhalten unter Berücksichtigung der Nullpunktverschiebung in Abhängigkeit von der Trockendichte beschrieben (siehe Abschnitt 5.2.5).
- Es wurden z. T. signifikante Unterschiede im Spannungs-Stauchungs-Verhalten von Proben verschiedener Stroharten gefunden. Diese Unterschiede sind in der Tendenz bei hochkant liegenden Strohballen größer als bei flach liegenden. Dabei scheinen unterschiedliche Stroharten für unterschiedliche Orientierungen unterschiedlich gut geeignet zu sein, siehe Abschnitt 5.2.6.
- Hochkant stehende Quaderballen weisen bei gleicher Trockendichte deutlich höhere E-Module auf als hochkant stehende HD-Ballen (siehe Abschnitt 5.2.7).
- Die Vermutung, aufeinander gestapelte, hochkant liegende Strohballen würden bei Belastung „ineinander rutschen“, konnte nicht erhärtet werden (siehe Abschnitt 5.2.8).
- Teilbelastete Strohballen weisen in beiden Orientierungen einen geringeren Elastizitätsmodul auf als vollflächig belastete Strohballen. Dabei ist der Unterschied zwischen teil- und vollflächig belasteten hochkant liegenden Ballen erheblich größer als bei flach liegenden Ballen. Es wird empfohlen, hochkant liegende Ballen nur vollflächig zu belasten (siehe Abschnitt 5.2.9).
- Verputzte Strohballen weisen erheblich höhere E-Module auf als unverputzte. Dabei gibt es einen signifikanten Unterschied ob der Putz direkt oder indirekt belastet wird. Bei indirekter Belastung ist der E-Modul deutlich geringer als bei direkt belasteten Putzen und die Gefahr von Putzfrakturen ist erheblich erhöht. Es wird empfohlen, von der Verwendung von Konstruktionen, bei der der Putz indirekt belastet wird, abzusehen (siehe Abschnitt 5.2.10).

5.3 Querdehnung und Poisson-Zahl m von nicht eingespannten HD-Weizenballen

Nach dem Poisson`schen Gesetz (siehe 1.4) resultiert aus der Längsstauchung eines Bauteils eine Querdehnung desselben. Dieser Effekt wurde auch bei den untersuchten Strohproben mit folgender Ausnahme beobachtet: Bei hochkant liegenden, nicht eingespannten HD-Weizenballen der Gruppe hoher Dichte wurde im Bereich 20-60 kN/m² eine Querstauchung in Folge einer Längsstauchung gemessen. Diese Anomalie kann wie folgend Erklärt werden:
Wie unter 5.1 beschrieben, kommt es bei der Belastung von hochkant liegenden HD-Ballen zu einem „Aufspreizen“ der Halme an den Oberflächen der Ballen. Aus diesem Aufspreizen an den Rändern resultiert eine Einschnürung in der Ballenmitte (siehe Abbildung 5.15).

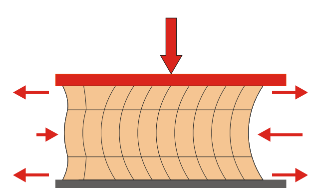


Abbildung 5.15: Querstauchung infolge von Längsstauchung

Bei den folgend diskutierten Werten und Kennlinien handelt es sich um die arithmetischen

Mittelwerte aus den Ballen des jeweiligen Dichtebereiches. Abbildung 5.16 zeigt das Verhältnis von Längsstauchung zu Querdehnung (Poisson-Zahl) flach und hochkant liegender HD-Weizenballen verschiedener Dichtegruppen in Abhängigkeit von der Spannung. Abgesehen von den hochkant liegenden Ballen der Gruppe der Proben mit hoher Dichte liegen die Poisson-Zahlen im betrachteten Bereich zwischen 0 und 80 kN/m² zwischen -1,9 und -3,1. Die hohe Abweichung der dichten hochkant liegenden Ballen (m= -2495 bei 35,5 kN/m²) resultieren aus dem oben beschriebenen Effekt der Einschnürung.
Während die Poisson Zahlen von flach liegenden Proben zunächst kleiner und ab ca. 55 kN/m² wieder größer werden, nehmen die Poisson-Zahlen der hochkant liegenden Proben zunächst zu und ab ca. 38 kN/m² wieder ab.
Tabelle 5.9 listet die durchschnittlichen Poisson-Zahlen m der verschiedenen Probengruppen mit ihren Trockendichten und Längen auf.

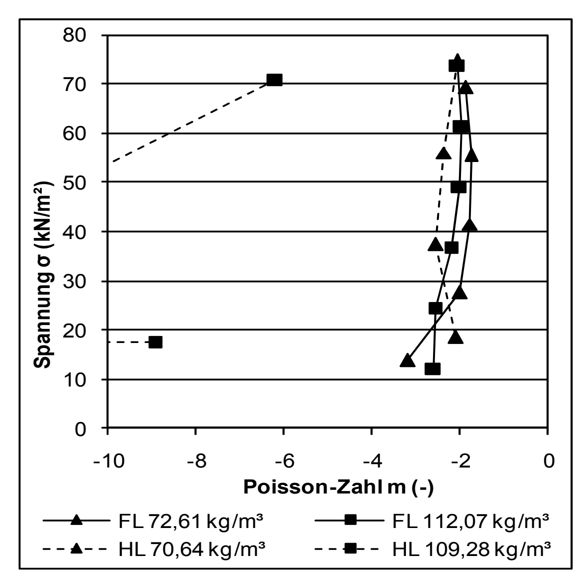


Abbildung 5.16: Spannung-Poisson-Zahl flach und hochkant liegender HD-Weizenballen ohne Einspannung (Mittelwerte)

Tabelle 5.9: Trockendichte, Länge, Probenanzahl und Poisson-Zahlen der Mittelwerte der Proben zu den Querdehnungstests

Ballenorientierung und -dichtegruppe	Ø ρ_{tr} (kg/m³)	Ø l (m)	Proben Anzahl	Ø m (-)
FL locker	72,61	0,74	2	-2,33
FL dicht	112,07	0,83	3	-2,40
HL locker	70,64	0,78	3	-2,35
HL dicht*	109,28	0,81	3	-9,55

Ø Mittelwert aus den betreffenden Testergebnissen; ρ_{tr}: Trockendichte (kg/m³); l: Ballenlänge (m); m: Poisson-Zahl (-); * der Wert m= -2495 bei 35,5 kN/m² wurde nicht berücksichtigt)

Aus den Mittelwerten der einzelnen Probengruppen wurden lineare Gleichungen entwickelt, mit welchen die Poisson-Zahlen in Abhängigkeit von der Trockendichte ermittelt werden können.
Zur Bestimmung der Poisson-Zahl flach liegender HD-Weizenballen ohne seitliche Einspannung in Abhängigkeit von der Trockendichte wurde folgende Gleichung entwickelt:

$$m_{FL} = 0{,}001 \cdot \rho_{tr} + 2{,}186$$

Dabei ist:
m_{FL}: Poisson-Zahl flach liegender HD-Weizenballen (dimensionslos)
ρ_{tr}: Trockendichte (kg/m³)

Zur Bestimmung der Poisson-Zahl hochkant liegender HD-Weizenballen ohne seitliche Einspannung in Abhängigkeit von der Trockendichte wurde folgende Gleichung entwickelt:

$$m_{HL} = 0{,}186 \cdot \rho_{tr} + 10{,}81$$

Dabei ist:
m_{HL}: Poisson-Zahl hochkant liegender HD-Weizenballen (dimensionslos)
ρ_{tr}: Trockendichte (kg/m³)

Vergleich mit früheren Untersuchungen
Ashour stellte fest, dass die Querdehnung mit steigender Last steigt. Dies konnte nur für bestimmte Spannungsbereiche bestätigt werden. Ebenso gibt er eine geringere Querdehnung (gemeint ist hier die Querkontraktion) für dichtere Ballen an. Dies wurde ebenso bestätigt wie seine Aussage, die Querdehnung hochkant liegender Ballen sei niedriger als die flach liegender Ballen.
Ashour stellte Gleichungen zur Berechnung der Querkontraktion auf, die in Anhang II.1 Abschnitt 6.4 wiedergegeben sind.

Bou Ali (1993) gibt Poisson-Zahlen für flach liegende Ballen von m=3,3-50 im Bereich von 0-600 kN/m² an.
Tompson et al (1995) stellen eine Poisson-Zahl für flach liegende Ballen von m=2,7 im Bereich von 0-69 kN/m² an.
Danielewicz/Reinschmit (2007) geben bei flach liegenden Quaderballen eine Querdehnung von 16% bei einer Stauchung von 50% an. Daraus ergibt sich eine Poisson-Zahl von m=3,13.
Die in der vorliegenden Arbeit ermittelten Werte der Poisson-Zahl für flach liegende Ballen korrelieren mit 2,3-2,4 in guter Weise mit den Ergebnissen früherer Untersuchungen.

5.4 Wiederausdehnung von eingespannten HD-Weizenballen

Um Hinweise auf das Verhalten von Strohballen nach dem Entfernen der Last im Anschluss an eine Kurzzeitbelastung bis zu einer Spannung von 40 kN/m² zu erhalten, wurden bei je drei seitlich eingespannten hochkant und flach liegenden HD-Weizenballen über bis zu 91 h die Wiederausdehnung gemessen.
Dabei konnte keine Korrelation zwischen Ballendichte und Höhe der Wiederausdehnung festgestellt werden. Unabhängig von der Ballenorientierung war die Wiederausdehnung nach ca. einer Viertelstunde nahezu abgeschlossen (vgl. Abbildung 5.17). Nach einer Stunde ist bei flach liegenden Ballen 67,5% der aufgebrachten Stauchung durch die Wiederausdehnung rückgängig gemacht, bei flach liegenden Ballen waren es 70%. Hochkant liegende HD-Weizenballen weisen nach einer Kurzzeitbelastung bis 40 kN/m² eine höhere Wiederausdehnungsrate auf als flach liegende HD-Weizenballen.
Diese Ergebnisse decken sich nicht mit denen von Ashour (2003), der berichtet, dass sich alle von ihm untersuchten Weizenballen nach Belastungsende wieder auf ihre ursprüngliche Höhe ausgedehnt haben.

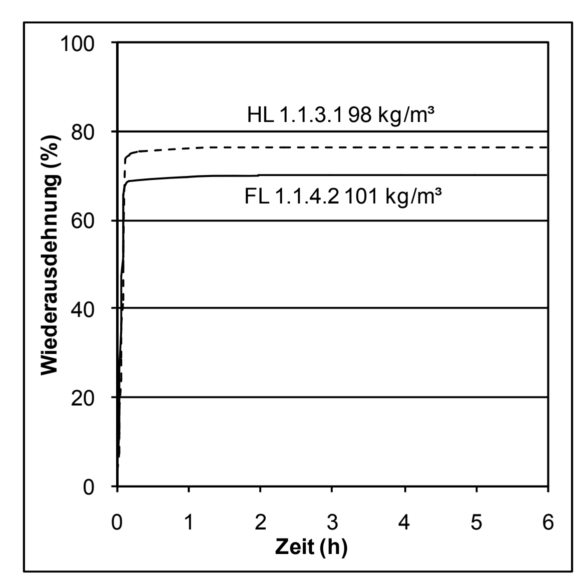


Abbildung 5.17: Wiederausdehung eines flach- und eines hochkant liegenden HD-Weizenballens mit seitlicher Einspannung

5.5 Prinzipielle Betrachtungen zum Relaxationsverhalten von Einzelballen

Es konnten drei Phasen im Relaxationsverhalten von Strohballen identifiziert werden, deren zeitliche Abfolge von Parametern wie der Trockendichte, der Belastungshöhe, der Halmorientierung und dem Vorhandensein einer Putzschicht und deren Eigenschaften abhängt:

1. Rapider Spannungsabbau: Steil abfallende Kennlinie in den ersten Minuten nach dem Aufbringen der Last
2. Sich verzögernder Spannungsabbau: Allmähliches Abflachen der Kennlinie
3. Geringer Spannungsabbau: Flache, im weiteren Verlauf nur noch wenig weiter abflachende Kennlinie, die klimaabhängige Schwankungen aufweist.

Drei Proben (unverputzt, hochkant liegend mit seitlicher Einspannung, Startspannung: 40 kN/m²) wurden über einen Zeitraum von 83 Tagen getestet. Die Relaxation kam bei diesen Tests nach ca. 55 Tagen zum Erliegen.

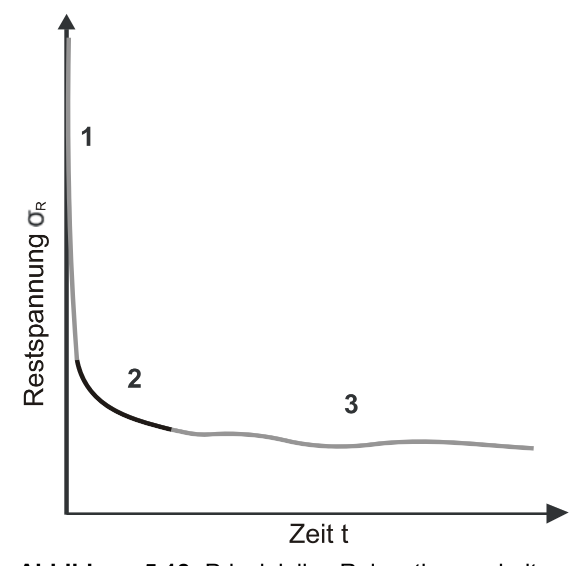


Abbildung 5.18: Prinzipielles Relaxationsverhalten der untersuchten Strohballen

5.6 *Einflüsse auf das Relaxationsverhalten von Einzelballen*

Das Relaxationsverhalten von Strohballen wurde im Rahmen dieser Dissertation in 99 Tests untersucht. Es fanden Tests mit flach- und hochkant liegenden sowie stehenden HD-Ballen unterschiedlicher Strohsorten, mit und ohne Einspannung, verputzt und unverputzt statt. Drei Tests wurden an hochkant liegenden Großballen durchgeführt.
Zum Einsatz kamen zwei unterschiedliche Testverfahren, welche unter 3.4 beschrieben sind.
Die Tests nach dem ersten Verfahren (Kombitest), nach welchem 64 Strohballen getestet wurden, schlossen sich an Spannungs-Stauchungstests mit den Kombiprüfständen an. Diese Relaxationstests 24 h bzw. 72 h, bei Großballen maximal einen Monat. Diese Tests wurden an flach und hochkant liegenden Ballen mit einer Startspannung[8] von 40 kN/m², an stehenden Ballen mit 20 kN/m² durchgeführt.
Nach dem zweiten Verfahren (Langzeittest) wurden 35 HD-Weizenballen flach und hochkant liegend mit Startspannungen von 10, 20, 40 und 60 kN/m² getestet. Bei diesem Verfahren wurde, bevor die eigentliche Relaxationsmessung begann, die Spannung im Abstand von jeweils 10 Minuten sechs mal wieder auf den Wert der Startspannung erhöht. Der Spannungsabbau wurde über bis zu 83 Tage gemessen.

5.6.1 Einfluss der Ballentrockendichte bei HD-Weizenballen im Langzeittest

Pro Startspannung, Ballenorientierung etc. in den unterschiedlichen Test-Setups wurden in der Regel drei Proben getestet. Diese Proben wurden zufällig ausgewählt und zeigten zufällig unterschiedliche Dichten. Mit nur drei Proben lässt sich ein Einfluss der Dichte auf das Relaxationsverhalten schlecht nachweisen und erst recht nicht quantifizieren.
Davon abweichend wurden je sechs Tests bei Startspannungen von 40 kN/m² an flach und hochkant liegenden HD-Weizenballen im Kombitest und an hochkant liegenden HD-Weizenballen im Langzeittest durchgeführt. Auch mit sechs Proben ist kein statistisch exakter Nachweis zu führen, trotzdem wurde der Versuch unternommen.

[8] Als Startspannung wird die Spannung zu Beginn des Testes unmittelbar nach dem Aufbringen der Kraft definiert.

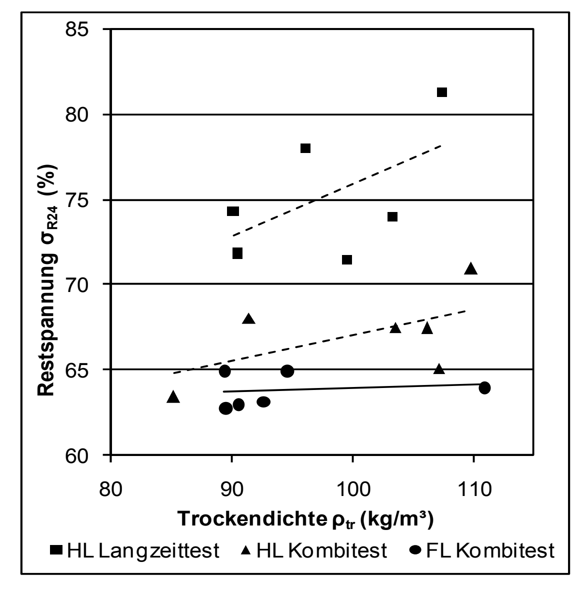


Abbildung 5.19: Restspannung nach 24 Stunden ausgehend von einer Startspannung von 40 kN/m² in Abhängigkeit von der Trockendichte

Abbildung 5.19 zeigt die Relaxation nach 24 Stunden in Abhängigkeit von der Trockendichte verschiedener Testreihen.
Bei allen Testreihen ist ersichtlich, dass die jeweiligen linearen Trendlinien eine positive Steigung aufweisen, dass also statistisch gesehen höhere Trockendichten eine höhere Restspannung bedingen. Jedoch ist das Bestimmtheitsmaß in allen Fällen besonders bei den flach liegenden Ballen ausgesprochen niedrig.
Die Trendlinien werden durch folgende lineare Gleichungen für seitlich eingespannte HD-Weizenballen bei einer Startspannung von 40 kN/m² beschrieben:
Hochkant liegend im Langzeittest

$$\sigma_{R24HLL} = 0,306 \cdot \rho_{tr} + 45,24 \qquad R^2=0,304$$

Dabei ist:

σ_{R24HLL}: Relaxation hochkant liegender HD Weizenballen im Langzeittest (%)

ρ_{tr}: Trockendichte (kg/m³)

Hochkant liegend im Kombitest

$$\sigma_{R24HLK} = 0,149 \cdot \rho_{tr} + 52,04 \qquad R^2=0,327$$

Flach liegend im Kombitest

$$\sigma_{R24FLK} = 0,019 \cdot \rho_{tr} + 61,97 \qquad R^2=0,026$$

5.6.2 Einfluss der seitlichen Einspannung bei HD-Weizenballen im Langzeittest

Abbildung 5.20 zeigt die mittleren Kennlinien flach und hochkant liegender HD-Weizenballen mit und ohne Einspannung bei ähnlicher Trockendichte. Die Kennlinien wurden im Lang-

zeittestverfahren (siehe Abschnitt 3.4.4) ermittelt. Die dargestellten Kennlinien stellen einen Ausschnitt dar. Bis auf „FL oE“ wurde die Relaxation über einen Zeitraum von 30 Tagen aufgezeichnet. Zur Bezeichnung: HL: hochkant liegend, oE: ohne seitliche Einspannung, XX kg/m³: durchschnittliche Trockendichte der Probengruppe.
Deutlich erkennbar ist, dass die eingespannten Ballen einem geringeren Spannungsabbau unterliegen als die nicht eingespannten Ballen. Diese Tendenz ist bei den hochkant liegenden Ballen besonders ausgeprägt. Quantifizierbar ist dies an den σ_{X24} und σ_{X120}-Werten, welche in Tabelle 5.10 ausgewiesen sind.

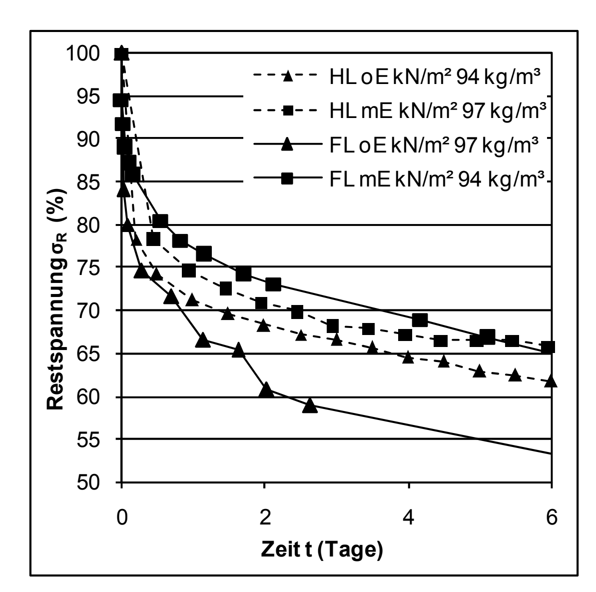


Abbildung 5.20: Vergleich des Relaxationsverhaltens unverputzter flach und hochkant liegender HD-Weizenballen mit und ohne Einspannung bei einer Startspannung von 40 kN/m²

Tabelle 5.10: Physikalische Parameter und Testergebnisse zum Einfluss der seitlichen Einspannung bei HD-Weizenballen im Langzeittest

Probengruppe	u (g/g)	ρ_{tr} (kg/m³)	σ_{R24} (%)	σ_{R120} (%)	Anzahl Proben	Dichtebereich (kg/m³)
HL oE 40 kN/m²	0,121	94,301	71,24	62,93	3	91-99
HL 40 kN/m²	0,096	96,59	74,64	66,50	3	90-103
FL oE 40 kN/m²	0,123	97,66	66,51	54,10	2	93-103
FL 40 kN/m²	0,125	94,24	77,00	66,80	3	92-101

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte; σ_{X24}: Restspannung nach 24 Stunden; σ_{X120}: Restspannung nach 120 Stunden; HL: hochkant liegend; oE: ohne Einspannung; FL: flach liegend

5.6.3 Einfluss der Startspannung und der Ballenorientierung bei HD-Weizenballen im Langzeittest

Abbildung 5.21 zeigt, dass anhand der zitierten Tests keine eindeutige Tendenz zur Abhängigkeit des Relaxationsverhaltens von der Startspannung festgestellt werden konnte. Im Bereich 40 und 60 kN/m² weisen die hochkant liegenden Probengruppen eine höhere Restspannung auf, im Bereich 10 und 20 kN/m² die flach liegenden.
Bei den flach liegenden Probengruppen erreicht die Restspannung bei einer Startspannung von 20 kN/m² ihr Maximum, fällt zu 40 kN/m² um zu 60 kN/m² wieder zu steigen. Die durchschnittliche Trockendichte der verschiedenen Probengruppen liegt dabei in einem Bereich zwischen 91 und 103 kg/m³. Vermutlich hat diese relativ hohe Dichteschwankung einen Einfluss auf das Relaxationsverhalten.
Bei den hochkant liegenden Ballen steigt die Restspannung mit Zunahme der Startspannung zunächst bis 40 kN/m² an und geht dann bei 60 kN/m² leicht zurück. Die durchschnittliche Trockendichte der verschiedenen Probengruppen liegt dabei in einem engen Bereich zwischen 96,6 und 99,5 kg/m³. Es wird davon ausgegangen werden, dass ein Einfluss der Trockendichte hier vernachlässigt werden kann.

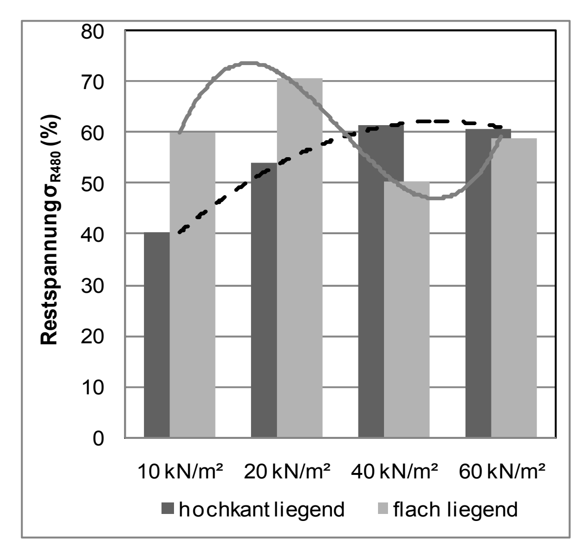


Abbildung 5.21: Relaxationsverhalten von HD-Weizenballen in Abhängigkeit von Startspannung und Ballenorientierung anhand der σ_{R480}-Werte im Langzeittest

Dass die Relaxation mit zunehmender Startspannung zunächst ansteigt, scheint evident: Eine höhere Startspannung induziert eine höhere Relaxation. Das Abnehmen der Relaxation bei weiter steigenden Dichten kann mit der zunehmenden Anfangsstauchung erklärt werden. Ab einem gewissen Punkt ist der Ballen so stark (vor) komprimiert, dass die Relaxation geringer wird. Für das erneute Ansteigen der Relaxation bei weiter steigender Startspannung bei den flach liegenden Ballen wurde keine Erklärung gefunden. Evtl. wird dieser Effekt durch den Unterschied in der Trockendichte der betreffenden Ballengruppen hervorgerufen.
Tabelle 5.11 enthält weitere Details zum Einfluss der Startspannung auf die Relaxation.

Tabelle 5.11: Physikalische Eigenschaften und Testergebnisse zum Einfluss der Startspannung auf die Relaxation bei HD-Weizenballen im Langzeittest

Probengruppe	u (g/g)	ρ_{tr} (kg/m³)	σ_{R24} (%)	σ_{R120} (%)	σ_{R480} (%)	Anzahl Proben	Dichtebereich (kg/m³)
HL 10 kN/m²	0,14	97	78	63	40	3	92-100
HL 20 kN/m²	0,15	98	77	69	54	3	85-111
HL 40 kN/m³	0,10	97	75	67	62	3	90-103
HL 60 kN/m³	0,11	99	76	68	61	3	98-102
FL 10 kN/m²	0,111	103	83	/	60	3	101-106
FL 20 kN/m²	0,13	91	82	/	71	3	89-93
FL 40 kN/m²	0,13	94	77	67	50	3	90-101
FL 60 kN/m²	0,16	91	77	/	59	3	97-93

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte; σ_{R24}: Restspannung nach 24 Stunden; σ_{R120}: Restspannung nach 120 Stunden; σ_{R480}: Restspannung nach 480 Stunden; HL: hochkant liegend; FL: flach liegend

5.6.4 Einfluss des Testsetups auf das Relaxationsverhalten

Wie in den Abschnitten 1.1.1.1, 3.4.4 und 5.6 erläutert und erwähnt, wurde der Spannungsabbau in zwei unterschiedlichen Verfahren untersucht. Abbildung 5.22 vergleicht die σ_{R24}-Werte von den unterschiedlichen Verfahren ausgehend von einer Startspannung von 40 kN/m² für unverputzte flach und hochkant liegende HD-Weizenballen.

Unabhängig von der Ballenorientierung weisen die im Langzeitverfahren (es wird eine Spannung aufgebracht, diese innerhalb von einer Stunde alle 10 Minuten wieder hergestellt, dann beginnt die eigentliche Relaxation) getesteten Ballengruppen höhere Restspannungen auf als die im Kombiverfahren (Relaxationstest über 24 bzw. 72 Stunden unmittelbar im Anschluss an einen Spannungs-Stauchungstest) getesteten. Dies wurde aufgrund des Testablaufes erwartet und ist gewollt. Die Restspannung nach 24 Stunden liegt im Langzeitverfahren bei flach liegenden Ballen um 13,2%, bei hochkant liegenden Ballen um 8,08% niedriger als im Kombitest. Tabelle 5.12 zeigt die Daten im Vergleich.

Das mehrfache Wiederherstellen der Startspannung im Langzeittest bildet das Nachspannen von Lasttragenden Strohballenkonstruktionen in der Praxis ab. Der Vergleich zwischen Kombi- und Langzeittest konnte bestätigen, dass dieses Nachspannen einen positiven Effekt auf die Relaxation hat.

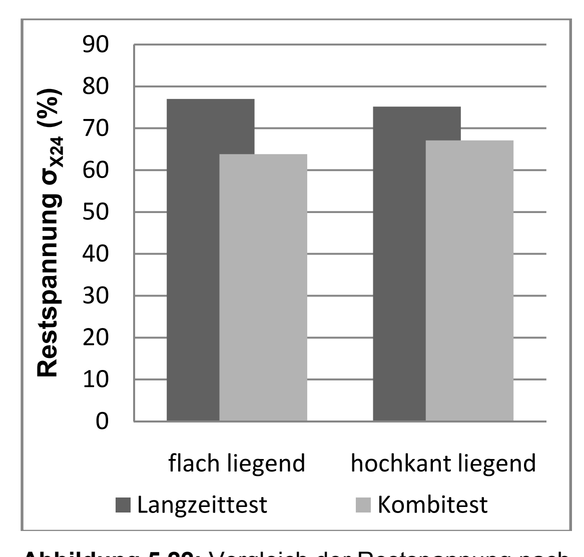


Abbildung 5.22: Vergleich der Restspannung nach 24 Stunden bei eingespannten, nicht verputzten flach- und hochkant liegenden HD-Weizenballen im Langzeit- und Kombitest bei einer Startspannung von 40 kN/m²

Tabelle 5.12: Physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse zum Einfluss des Testsetups bei HD-Weizenballen im Langzeit- und Kombitest ausgehend von einer Startspannung von 40 kN/m²

Probengruppe	u (g/g)	ρ_{tr} (kg/m³)	σ_{R24} (%)	Anzahl Proben	Dichtebereich (kg/m³)
HL Langzeittest	0,125	94,24	77,00	3	90-101
HL Langzeittest	0,110	97,754	75,19	6	90-107
HL Kombitest	0,127	94,584	63,80	6	89-111
HL Kombitest	0,114	100,54	67,11	6	91-110

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte; σ^{R24}: Restspannung nach 24 Stunden; HL: hochkant liegend; FL: flach liegend

5.6.5 Einfluss der Ballenart

Im Kombiverfahren wurden sowohl hochkant liegende HD-Ballen als auch hochkant liegende Q-Ballen aus Weizenstroh getestet. Abbildung 5.23 stellt das Relaxationsverhalten von HD-und Q-Ballen dar, Details können Tabelle 5.13 entnommen werden. Es konnte kein signifikanter Unterschied im Relaxationsverhalten von HD- und Q-Weizenballen festgestellt werden. Kleine Unterschiede können auf den etwas unterschiedlichen Testablauf und unterschiedliche Klimata während der Tests zurück zu führen sein.

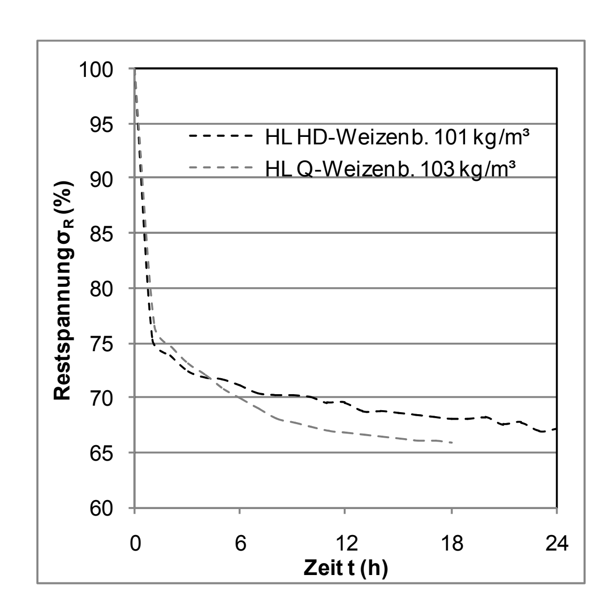


Abbildung 5.23: Vergleich des Relaxationsverhaltens von hochkant liegenden, unverputzten, seitlich eingespannten HD- und Q-Weizenballen ausgehend von einer Startspannung von 40 kN/m² im Kombitest

Tabelle 5.13: Physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse zum Einfluss des Testsetups bei HD-Weizenballen im Kombitest ausgehend von einer Startspannung von 40 kN/m²

Probengruppe	u (g/g)	ρ_{tr} (kg/m³)	σ_{R24} (%)	Anzahl Proben	Dichtebereich (kg/m³)
HL HD-Weizenballen	0,11	101	67	6	91-110
HL Q-Weizenballen	0,12	104	63	3	103-105

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte; σ_{R24}: Restspannung nach 24 Stunden; HL: hochkant liegend

5.6.6 Einfluss der Strohart auf das Relaxationsverhalten

Aufgrund der unzureichenden Datenlage konnte der Einfluss der Strohart nicht geklärt werden, jedoch werden Tendenzen sichtbar. Abbildung 5.24 vergleicht die Restspannung nach 24 Stunden, ausgehend von einer Startspannung von 40 kN/m² der Ballen der untersuchten Stroharten. Dabei bleibt die Trockendichte unberücksichtigt. Tabelle 5.14 können die zugehörigen Daten entnommen werden.

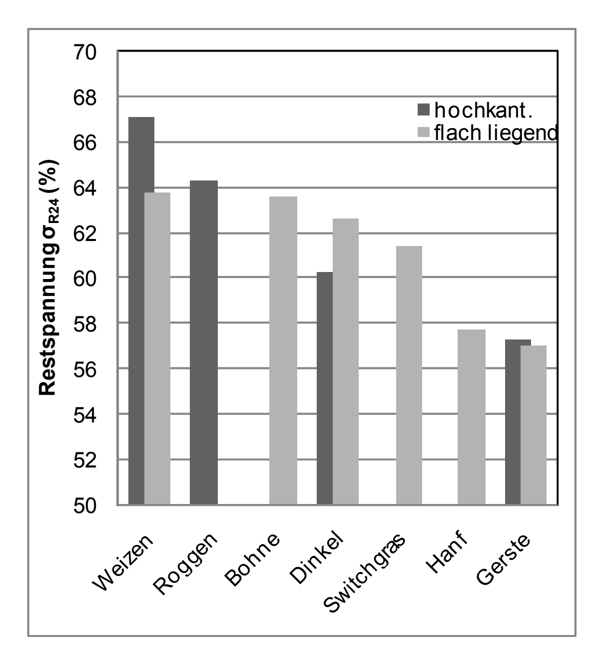


Abbildung 5.24: Vergleich der Restspannung nach 24 Stunden bei eingespannten, nicht verputzten flach- und hochkant liegenden HD-Ballen verschiedener Stroharten im Kombitest bei einer Startspannung von 40 kN/m²

Tabelle 5.14: Trockendichten und Testergebnisse zum Einfluss der Strohart auf das Relaxationsverhalten unverputzter, eingespannter HD-Ballen im Kombitest ausgehend von einer Startspannung von 40 kN/m²

Proben-gruppe	ρ_{tr} (kg/m³)	σ_{R24} (%)	Anzahl Proben	Dichtebe-reich (kg/m³)
FL Weizen	95	64	6	89-111
FL Bohne	88	64	3	87-89
FL Dinkel	83	63	3	81-85
FL Switchg	88	61	1	/
FL Hanf	110	58	2	106-114
FL Gerste	77	57	3	69-89
HL Weizen	101	67	6	91-110
HL Roggen	86	64	3	83-88
HL Dinkel	82	60	3	79-86
HL Gerste	93	57	2	90-96

ρ_{tr}: Trockendichte; σ_{R24}: Restspannung nach 24 Stunden; HL: hochkant liegend; FL: flach liegend

5.6.7 Einfluss des Lehmputzes auf das Relaxationsverhalten

Abbildung 5.25 vergleicht die Restspannung nach 24 Stunden von unverputzten HD-Weizenballen, verputzen Ballen, bei denen der Lehmputz indirekt belastet wurde (Lasteintragsplatte lag nicht auf dem Lehmputz auf) und verputzten Ballen, bei denen die Last direkt in den Lehmputz eingeleitet wurde. Der

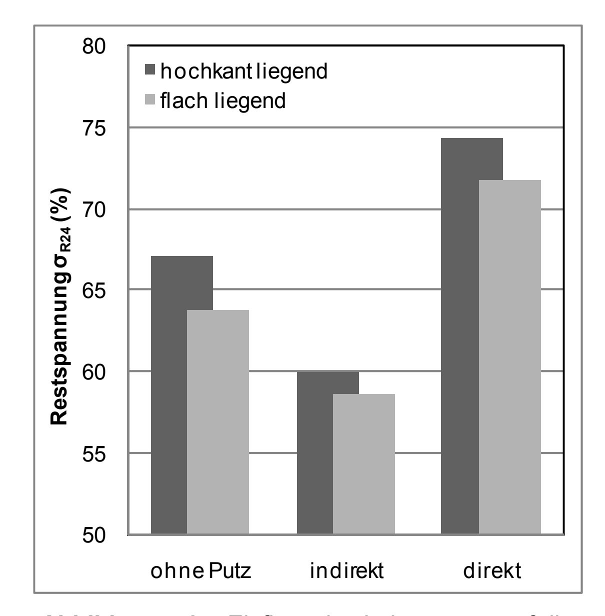


Abbildung 5.25: Einfluss des Lehmputzes auf die Relaxation nach 24 Stunden bei seitlich eingespannten HD-Einzelballen im Kombitest ausgehend von einer Startspannung von 40kN/m²

Testablauf ist unter 3.4.2.1 beschrieben. Hochkant und flach liegende Ballen verhalten sich analog, flach liegende Ballen weisen dabei eine geringere Restspannung auf als hochkant liegende Ballen.
Die Probengruppe, bei welcher der Lehmputz direkt belastet wird, weist die höchste Restspannung auf, die indirekt belasteten Ballen die niedrigste, niedriger als die unverputzten Ballen. Dies kann durch eine geringere Stauchung der indirekt verputzten Ballen gegenüber den unverputzten Ballen und einem nachlassenden Verbund zwischen der tragenden Putzschicht und dem belasteten Stroh erklärt werden. Zu den Daten siehe Tabelle 5.16.

Tabelle 5.15: Trockendichten und Testergebnisse zum Einfluss des Lehmputzes auf das Relaxationsverhalten eingespannter HD-Ballen im Kombitest ausgehend von einer Startspannung von 40 kN/m²

Proben-gruppe	ρ_{tr} (kg/m³)	σ_{R24} (%)	Anzahl Proben	Dichte-bereich (kg/m³)
FL ohne Putz	95	64	6	89-111
FL indirekt	112	59	3	106-121
FL direkt	106	72	3	104-109
HL ohne Putz	101	67	6	91-110
HL indirekt	111	60	3	/
HL direkt	93	74	3	83-100

ρ_{tr}: Trockendichte; σ_{R24}: Restspannung nach 24 Stunden; HL: hochkant liegend; FL: flach liegend

5.6.8 Einfluss eines Wasserschadens auf das Relaxationsverhaltens

In Abbildung 5.26 werden die Relaxationskennlinien flach- und hochkant liegender verputzter und unverputzter seitlich eingespannter HD-Weizenballen verglichen. Nach einer Relaxation von 24 Stunden wurden die Proben 10 cm hoch unter Wasser gesetzt (zum Testablauf siehe 3.4.2.4). Es wurde jeweils ein Versuch durchgeführt. Die Versuchsreihe soll Tendenzen aufzeigen (zu den Werten siehe Tabelle 5.16).

Bei allen untersuchten Proben bricht die Spannung nach dem Zufügen des Wassers spontan ein und stabilisiert sich nach einigen Stunden auf niedrigem Niveau.

Die Restspannungswerte der hochkant liegenden Ballen liegen jeweils über den entsprechenden Werten der flach liegenden Ballen. Es wird vermutet, dass das krustierte Lignin in den Zellen der Strohhalme unter dem Einfluss des Wassers wieder flexibel wird und die Ballen dadurch elastischer werden. Dieser Effekt hat offensichtliche einen größeren Einfluss auf die flach liegenden, als auf die stehenden Ballen.

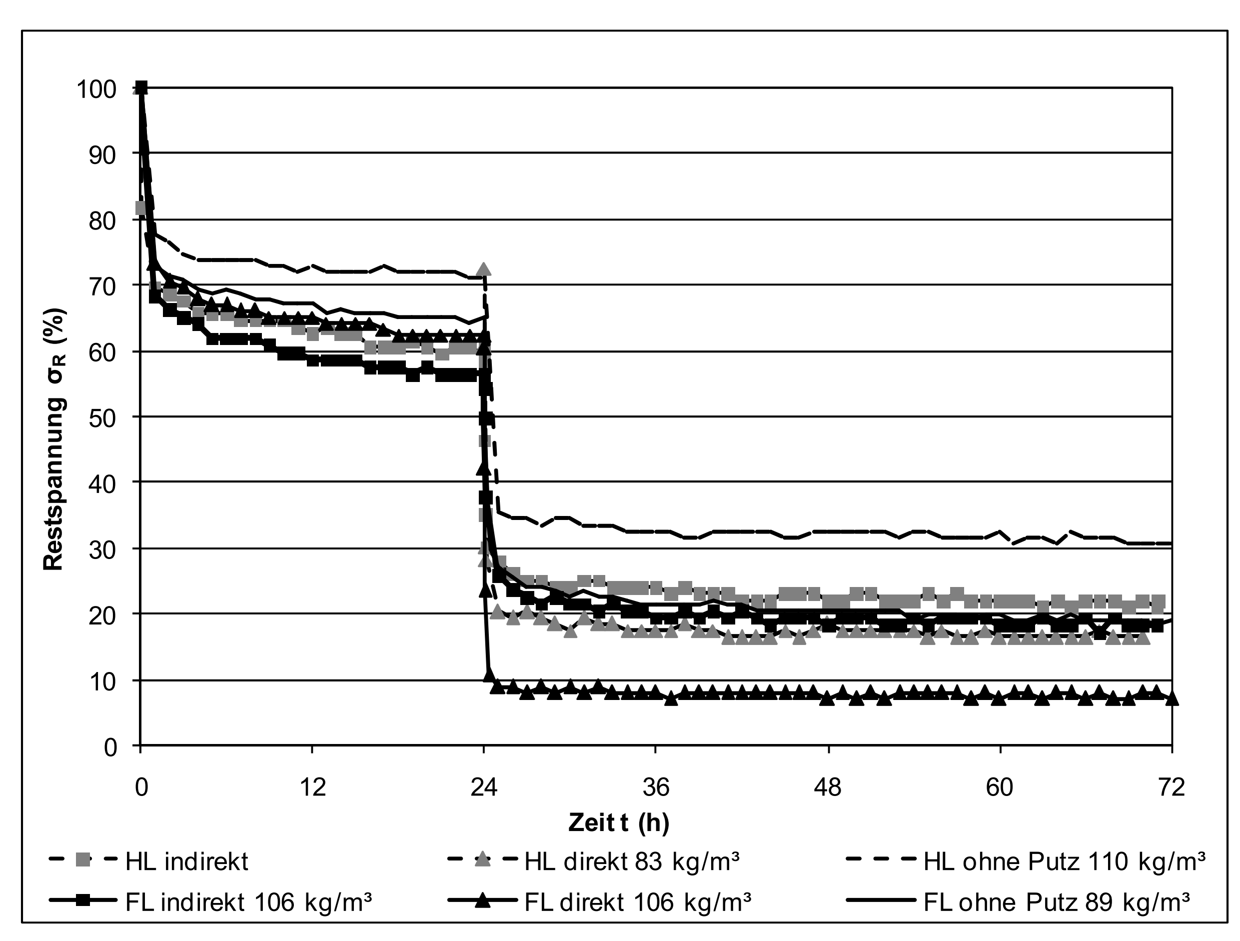


Abbildung 5.26: Einfluss eines Wasserschadens auf die Relaxation nach Stunden bei seitlich eingespannten HD-Einzelballen im Kombitest ausgehend von einer Startspannung von 40kN/m² auf Strohballen unterschiedlicher Dichte

Die geringsten Restspannungen treten bei den flach liegenden verputzten Ballen auf. Bei den verputzten Ballen übernimmt der Putz den Hauptteil der Tragfunktion. Er sorgte dafür, dass der Ballen beim Aufbringen der Spannung weniger gestaucht wurde als ein unverputzter Ballen. Die Vorspannung des Ballens selbst ist also aufgrund der geringeren Stauchung geringer als bei unverputzten Ballen. Fällt nun die Tragwirkung des Putzes weg, sinkt die Spannung wegen der geringeren Stauchung des Ballens deutlich stärker als bei den unverputzten Ballen. Der Putz wurde durch das Wasser innerhalb von Sekunden zerstört. Eine so schnelle Zerstörung von Lehmputzschichten ist ungewöhnlich. Jedoch wurden entsprechende Tests nach dem Wissen des Verfassers bisher nur an nicht belasteten Lehmproben durchgeführt. Es wird vermutet, dass die aufgebrachte Spannung bei dem beschriebenen Experiment zu der beobachteten, schnellen Putzzerstörung beiträgt.

Tabelle 5.16: Trockendichten und Testergebnisse zum Einfluss eines Wasserschadens auf das Relaxationsverhalten verputzter und unverputzter, ein-

gespannter HD-Weizenballen im Kombitest ausgehend von einer Startspannung von 40 kN/m²

Probengruppe	ρ_{tr} (kg/m³)	σ_{R72} (%)
FL indirekt	106	18
FL direkt	106	7
FL ohne Putz	89	19
HL indirekt	/	22
HL direkt	83	16
HL ohne Putz	110	31

ρ_{tr}: Trockendichte; σ_{R72}: Restspannung nach 72 Stunden; HL: hochkant liegend; FL: flach liegend

5.6.9 Einfluss eines Garnausfalls auf das Relaxationsverhalten

Nach einer Relaxation von 24 Stunden wurden in Kombitests mit seitlicher Einspannung bei je einem flach und hochkant liegenden, unverputzten, verputzten mit indirekter- und verputztem Ballen mit direkter Lasteinleitung die Ballenbindungen durchtrennt.
Bei den verputzten Ballen ist kein Effekt feststellbar. Bei den flach liegenden Ballen fällt die Restspannung in der ersten Stunde nach dem Durchtrennen der Bindung um ca. 1,43%, bei den hochkant liegenden Ballen fällt sie in der ersten Stunde um 14,45%. Ein Versagen der Ballenbindung hat also auf hochkant liegende Ballen einen deutlich größeren Effekt als auf flach liegende Ballen mit seitlicher Einspannung.
Diese kann mit der Ballenstruktur und in der Lage der Garnbänder begründet werden. Bei den flach liegenden Ballen mit seitlicher Einspannung wird der Ballen oben und unten, wo die Garnbänder verlaufen, durch die Lasteinleitungsplatten begrenzt. An diesen Seiten hat das Durchtrennen der Garnbänder keinen Effekt. An den Längsseiten befindet sich über einem großen Teil der Ballenfläche die seitliche Einspannung, welche die vorher durch die Garnbänder aufgenommene Kraft übernehmen kann. Letzteres ist auch bei hochkant liegenden Ballen der Fall. Durch die andere Ballenorientierung verlaufen die Garnbindungen hier jedoch frei an den langen Seiten der Ballen, die nicht durch die Lasteinleitungsplatten abgedeckt werden. Zusätzlich begünstigt die vertikale Orientierung der Halme ein „Ausspreizen“ des Ballens infolge eines Garnausfalls.

5.7 Prinzipielle Betrachtungen zum Kriechverhalten von Einzelballen

Es konnten drei Phasen im Kriechverhalten von HD-Ballen identifiziert werden, deren zeitliche Abfolge von Parametern wie der Trockendichte, der Belastungshöhe und der Halmorientierung abhängt:

4. Rapide Stauchung: Steil ansteigende Kennlinie in den ersten Minuten nach dem Aufbringen der Last
5. Sich verzögernde Stauchung: Allmähliches Abflachen der Kennlinie in den ersten Tagen nach dem Aufbringen der Last
6. Geringe Stauchungszunahme: Flache, im weiteren Verlauf nur noch wenig weiter abflachende Kennlinie ab maximal ca. 5 Tage nach dem Aufbringen der Last.

Die Kriechverformung kam bei keiner der untersuchten Proben innerhalb des Testzeitraumes zum Erliegen.

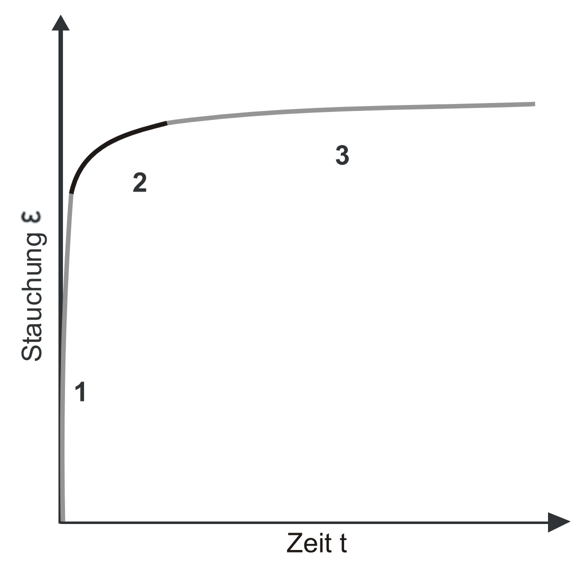


Abbildung 5.27: Prinzipielles Kriechverhalten von HD-Ballen

5.8 *Einflüsse auf das Kriechverhalten von Einzelballen*

5.8.1 Einfluss der Strohart

Der Einfluss der Strohart auf das Kriechverhalten konnte in dieser Dissertation nicht geklärt werden, da jeweils nur eine Switchgras und Miscanthusprobe getestet wurden. Auf dieser Basis geben Abbildung 5.28 und Tabelle 5.17 einen Hinweis, welchen Einfluss die Strohart haben kann. Zu erkennen ist, dass der Miscanthusballen eine höhere, der Switchgrasballen eine geringere Stauchung aufweist als die Weizenballen im Durchschnitt.

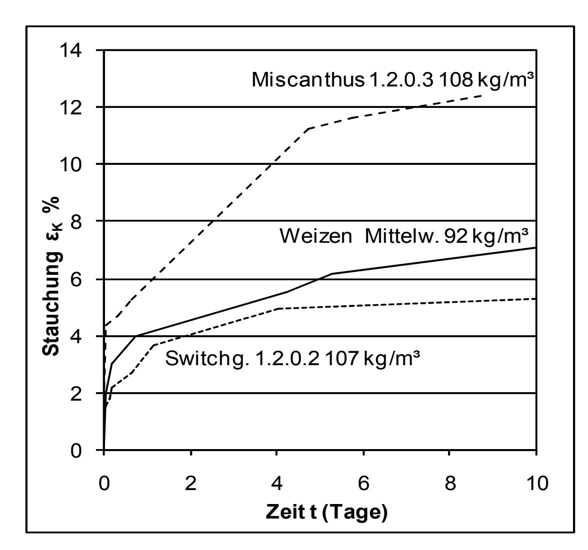


Abbildung 5.28: Kriechverhalten flach liegender HD-Switchgras- Miscanthus- und Weizenballen bei 60 kN/m²

Tabelle 5.17: Testwerte der Switchgras- und Miscanthusballen und durchschnittliche Werte der Probengruppe Weizenballen flach liegend 60 kN/m²

Probengruppe	ρ_{tr} (kg/m³)	u (g/g)	ε_{K20} (%)	ε_{G20} (%)	Anzahl Proben	Proben Nummern
S FL 60 kN/m²	107	0,15	/	/	1	1.2.0.2
M FL 60 kN/m²	108	0,09	5,7	34,0	1	1.2.0.3
Ø W FL 60 kN/m²	92	0,12	7,7	36,0	3	1.2.1.1-1.2.1.3

S: Switchgras; M: Miscanthus; W: Weizen; u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte; ε_{K20}: Kriechstauchung nach 20 Tagen; ε_{G20}: Gesamtstauchung nach 20 Tagen; Ø Mittelwert aus den betreffenden Werten;

5.8.2 Einfluss der Spannung und der Halmorientierung

Abbildung 5.29 und Tabelle 5.18 zeigen die Kurvenverläufe bzw. Daten der in Kriechtests untersuchten Weizenproben im Durchschnitt. Deutlich sichtbar ist, dass die grau gezeichneten Kennlinien, welche zu den mit 20 kN/m² belasteten Probengruppen gehören, im Diagramm unter den schwarz gezeichneten Kennlinien liegen. Eine höhere Spannung zieht also im untersuchten Spannungsbereich eine größere Kriechverformung nach sich. Aufgrund der geringen Probenzahl wurde davon abgesehen, dies zu quantifizieren und in einer Gleichung auszudrücken.
Ebenfalls sichtbar ist, dass die zu den flach liegenden Probengruppen gehörenden durchgehend gezeichneten Kennlinien steiler sind und höher liegen als die zu den hochkant liegenden Probengruppen gehörenden gestrichelten Kennlinien. Der Schluss, hochkant liegende Ballen würden weniger kriechen, als flach liegende Ballen, ist jedoch voreilig. Einerseits ist die Belastungshöhe nicht immer vergleichbar (40 kN/m² bei hochkant liegenden Ballen, 60 kN/m² bei flach liegenden Ballen), andererseits sind zwischen flach und hochkant liegenden Ballengruppen hohe Dichteunterschiede existent, welche einen konkreten Schluss nicht zulassen.

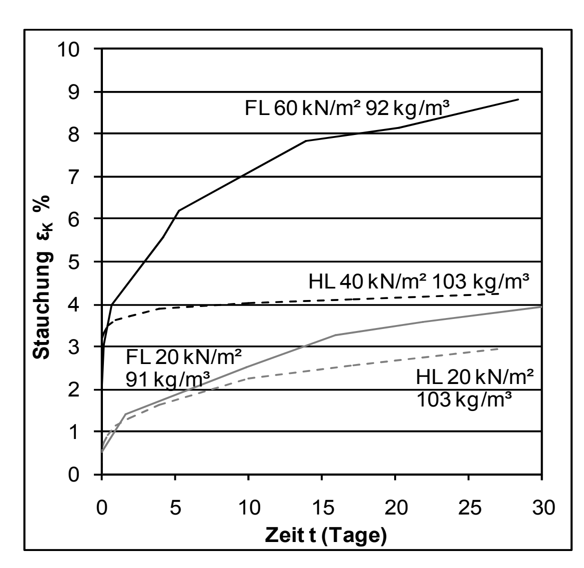


Abbildung 5.29: Kriechverhalten flach- und hochkant liegender Weizenballen bei unterschiedlicher Belastung

Tabelle 5.18: Durchschnittliche Werte der unterschiedlichen Probengruppen zum Kriechverhalten von HD-Weizenballen

Proben-gruppe	ρ_{tr} (kg/m³)	u (g/g)	ε_{K20} (%)	ε_{G20} (%)	Anzahl Proben	Proben Nummern
FL 20 kN/m²	91	0,13	3,4*	12,0	3	1.2.2.1, 1.2.2.3, 1.2.2.4
FL 60 kN/m²	92	0,12	7,7	36,0	3	1.2.1.1-1.2.1.3
HL 20 kN/m²	103	0,11	2,7	7,2	2	1.2.3.1, 1.2.3.2
HL 40 kN/m²	103	0,12	4,2	11,1	3	1.2.4.1-1.2.4.3

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte; ε_{K20}: Kriechstauchung nach 20 Tagen; ε_{G20}: Gesamtstauchung nach 20 Tagen;

5.8.3 Einfluss der Ballentrockendichte auf das Kriechverhalten

Aufgrund der geringen Prüfkörperanzahl konnte ein Einfluss der Trockendichte auf das Kriechverhalten nicht sinnvoll ermittelt werden. Es zeichnen sich auch keine eindeutigen Trends ab.

5.8.4 Einfluss eines Wasserschadens

Unter 5.6.8 wurde beschrieben, welchen Einfluss ein Wasserschaden auf die Relaxation von verputzten und unverputzten HD-Weizenballen hat. Es wurde festgestellt, dass die Spannung spontan um bis zu 45 % auf nur noch 7% des Startwertes nach 24 Stunden ungestörter Relaxation und 48 Stunden Relaxation unter Wassereinfluss abfällt. Es stellte sich die Frage, inwieweit sich dieser Spannungsabfall auf das Kriechverhalten auswirkt. Konkret ging es um die Frage, ob Last tragende Strohballenkonstruktionen im Fall eines Wasserschadens einstürzen oder nicht.
Dazu wurde der unter 3.4.2.5 beschriebene Test entwickelt, bei dem zunächst eine Spannung von 40 kN/m² aufgebracht wird. Diese Spannung entspricht der Vorkomprimierung einer Wand. Nach dem Aufbringen der Spannung wird die Relaxation über 24 Stunden aufgezeichnet und der Ballen danach 10 cm unter Wasser gesetzt. Daraus resultiert, wie unter 5.6.8 beschrieben, ein spontanes Absinken der Spannung (Relaxation). Durch den Prüfstand wird eine Last von 20 kN/m² (=50% der Startspannung) simuliert. Sobald die Restspannung unter 20 kN/m² (50%) fällt, beginnt der Ballen zu kriechen. Diese Kriechverformung ist in Abbildung 5.30 dargestellt. Je Orientierung wurde ein Test durchgeführt. Die Tests sollen Tendenzen aufzeigen.

Bei vergleichbaren Trockendichten unterliegt der hochkant liegende Ballen einer deutlich höheren Kriechverformung als der flach liegende Ballen. Bei beiden Proben verläuft die Kriechverformung jedoch auf sehr geringem Niveau. Dieses Ergebnis legt den Schluss nahe, dass aus einem Wasserschaden kein spontanes Versagen einer Last tragenden Konstruktion aus Strohballen resultiert.

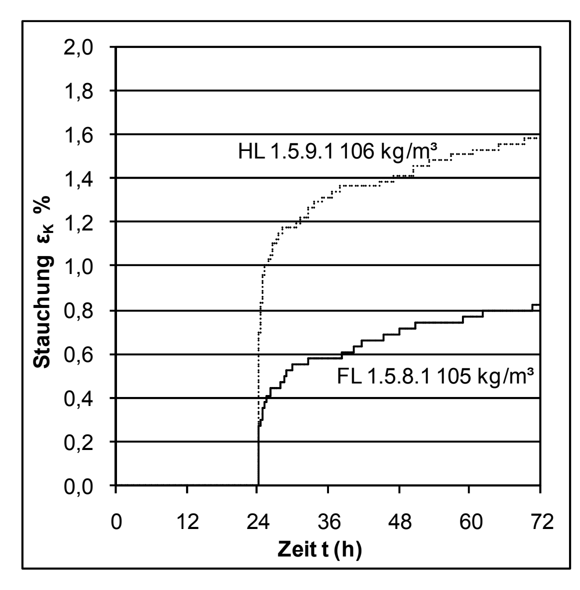


Abbildung 5.30: Kriechverformung flach und hochkant liegender seitlich eingespannter HD-Weizenballen unter Wassereinfluss

5.9 Zum elastomechanischen Verhalten von Wänden aus HD-Weizenballen

Insgesamt wurden acht Testreihen an Wänden durchgeführt. An fünf davon wurden Messungen zum elastomechanischen Verhalten gemacht. Relevante Werte sind in Tabelle 5.19 dargestellt.

Tabelle 5.19: Kennwerte zum elastomechanischen Verhalten der untersuchten Wände

Wandtest Nr.	Ballenlagen	Höhe unbelastet (m)	ρ_{tr} (kg/m³)	ε_{40} (%)	E-Modul (kN/m²)	ε_p (%)	σ_{R24} (%)	σ_{R480} (%)
Wt 3 FL u	7	2,53	92	/	312	-0,8	/	/
Wt 5 FL u	7	2,46	95	9,1	417	-0,8	72,2	53,6
Wt 6 HL u	5	2,38	98	7,3	661	-0,4	68,1	38,8
Wt 7 FL v	6	2,17	104	0,02	265900	0,00	89,4	34,4
Wt 8 FL u	6	2,19	107	2,9	792	-2,2	73,4	42,8

ρ_{tr}: Durchschnittliche Trockendichte. Da die relative Luftfeuchte und Temperatur der Ballen verfügbar sind, wurde die Trockendichte mit dem durchschnittlichen Feuchtegehalt von 0,128 aller gemessenen Weizenballen berechnet; ε_{40}: Stauchung bei einer Spannung von 40 kN/m²; ε_p: Nullpunktverschiebung; σ_{R24}: Restspannung nach 24 Stunden; σ_{R480}:Restspannung nach 480 Stunden; FL: Ballen flach liegend; HL: Ballen hochkant liegend; u: unverputzt; v: verputzt

5.9.1 Zum Aufbau der Wandkonstruktionen

Eine freistehende, drei Meter lange Wand aus flach liegenden Strohballen ließ sich nicht errichten. Auch unter zur Hilfenahme von Ballennägeln war es nicht möglich, eine hinreichend stabile Wand aufzubauen, die ein sinnvolles Testen gestattet hätte.
Gute Erfahrungen wurden mit U-Profilen, welche die Wände seitlich begrenzten und mit eingelegten Bohlen gegen ein seitliches Ausbeulen, gemacht. Solchermaßen aufgebaute Wände könnten sich für eine Vorfertigung eignen. Die seitlichen U-Profile der Wände können zum Anschluss von Fenstern etc. genutzt werden. Evtl. kann in diesem Fall auf Ballennägel verzichtet werden.
Ebenfalls gute Erfahrungen wurden mit seitlichen Begrenzungen aus Kanthölzern gemacht. Jedoch ist das Ausklinken der Ballen im Bereich dieser Kanthölzer arbeitsintensiv. Durch das Vorspannen mittels Paketbändern konnte eine Vorspannung von bis zu 13 kN/m² bei einer Stauchung von ca. 4% erreicht werden.
Eine im Februar 2007 in einer nicht klimatisierten Halle aufgebaute Wand wurde direkt nach dem Erstellen mit 2 Putzlagen versehen. Nach dem Trocknen wurde eine dritte Putzlage aufgebracht. Die Trocknung war erst im Juni abgeschlossen. Während des Trocknens bildete sich an der Putzoberfläche leichter Schimmel und ein Bewuchs aus Weizenpflanzen. Nach dem Trocknen des Putzes vertrockneten die Weizensprösslinge, der Schimmelpilz breitete sich nicht weiter aus.

5.9.2 Zum Spannungs-Stauchungsverhalten der untersuchten Wandkonstruktionen

Abbildung 5.31 zeigt das Spannungs-Stauchungsverhalten der untersuchten Wände. Die fast senkrecht verlaufende Kennlinie gehört zu der verputzten Strohballenwand (Wt7). Sie wies einen Elastizitätsmodul von über 2 GN/m² auf und wurde bei einer Spannung von 40 kN/m² um 0,314 mm gestaucht. Hier muss kritisch angemerkt werden, dass die verwendeten Wegaufnehmer für so kleine Wege nicht ausgelegt sind. Es kann jedoch festgestellt werden, dass die Verformung der Wand bei 40 kN/m² ohne Hilfsmittel nicht wahrnehmbar war und dass der Putz nicht brach.
Die Wand aus hochkant liegenden Ballen (Wt6) wies mit 661 kN/m² einen deutlich höheren E-Modul auf als die Wände aus flach liegenden Ballen. Die in Wandtest 5 (Wt5) getestete Wand besteht zum größten Teil aus Ballen, welche bereits bei Wandtest 3 (Wt3) eingesetzt worden waren. Sie waren etwas vorkomprimiert, was sich in der höheren Dichte der in Wandtest 5 getesteten Wand niederschlägt. Entsprechend steiler verläuft die Kennlinie dieser Wand. Hier bestätigt sich die Beobachtung von Danielewicz/Reinschmidt (2006), dass Strohballen bei wiederholter Stauchung einen höheren E-Modul aufweisen (die Steifigkeit der Ballen nimmt bei jedem Belastungszyklus zu, allerdings auch die Gesamtstauchung). Evtl. könnte es sinnvoll sein, Strohballen vor dem Einbau sehr hoch zu belasten, um dann im eingebauten Zustand von einer höheren Steifigkeit zu profitieren. Im Übrigen stellt der Herstellungsprozess der Strohballen ebenfalls eine Vorkomprimierung dar. Diese Sichtweise unterstreicht die Er-

kenntnis, dass dichtere Ballen eine höhere Steifigkeit aufweisen als weniger dichte.

Auch bei Wandtest 8 (WT8) zeigt sich die Wirkung der Vorspannung. Die Wand zu Test 8 wurde durch Verpackungsbänder vorgespannt. Dabei wurde diese Wand um 4,41% gestaucht. Nach einer Relaxationszeit von einem Monat wurde sie dem Spannungs-Stauchungstest unterzogen. Die so belastete Wand zeigt einen deutlich höheren Elastizitätsmodul als die anderen Wände aus unverputzten, flach liegenden Ballen und auch eine höhere Steifigkeit als die Wand aus den hochkant liegenden Ballen. Beim Umsetzen der Druckzylinder bei dieser Wand wurde die Spannung auf knapp unter 5 kN/m² reduziert, was ein Ausdehnen der Wand zur Folge hatte. Deutlich erkennbar ist auch hier die höhere Steifigkeit der Wand bei der Wiederbelastung.
Die Ergebnisse der beschriebenen Tests korrespondieren mit denen von Bou-Ali (1993), der bei Wänden aus flach liegenden Strohballen bei Spannungen um 34 kN/m² Stauchungen von 7-8% dokumentierte.
Die Ergebnisse der Tests an verputzten Wänden von Grandsert (1999), der Elastizitätsmodule zwischen 29 und 89 MN/m² registrierte, legen den Schluss nahe, dass die in dieser Dissertation verwendeten Wegnehmer für die kleinen Stauchungen bei verputzten Wänden tatsächlich ungeeignet waren.

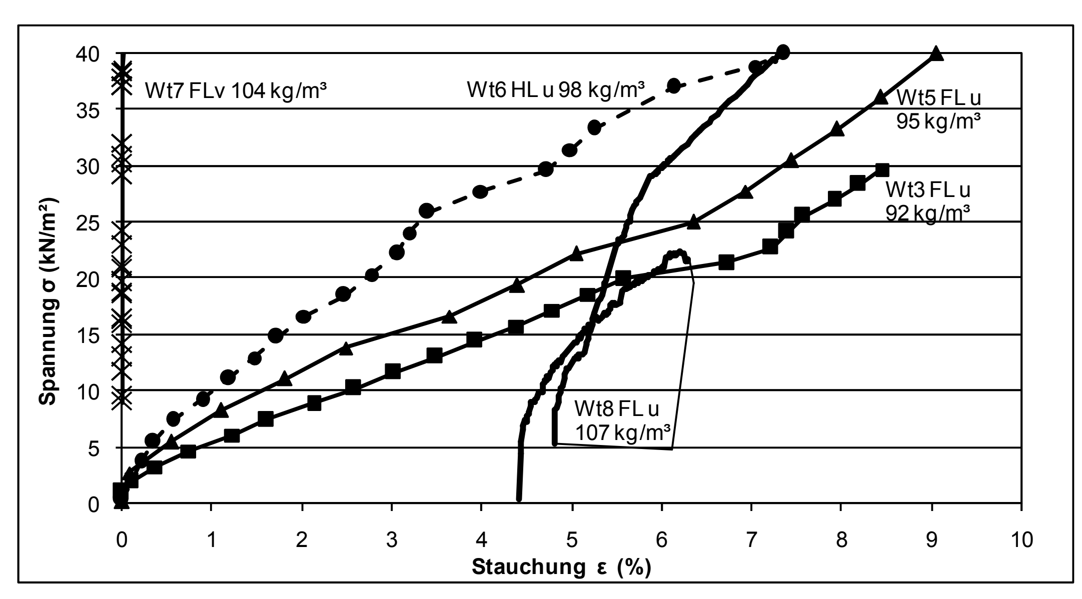


Abbildung 5.31: Spannungs-Stauchungsverhalten der untersuchten Wände

5.9.3 Zum Verhältnis Vertikalspannung zu Horizontalspannung der untersuchten Wandkonstruktionen

Aus einer vertikalen Belastung resultiert nach dem Poisson´schen Gesetz eine Querdehnung. Wird diese Querdehnung wie im vorliegenden Fall durch seitliche Begrenzungselemente verhindert, entsteht in Bauteilen, welche die Begrenzungselemente verbinden, eine Spannung. Das Verhältnis dieser horizontalen Spannung zur aufgebrachten Vertikalspannung wurde in den beiden Wandtests 3 und 6 untersucht und sind in Abbildung 5.32 dargestellt. Es ist deutlich, dass das Verhältnis Horizontal-Vertikalspannung der Wand aus hochkant liegenden Ballen zunächst kleiner ist als jenes der Wand aus flach liegenden Ballen. Es ist deutlich, dass das Verhältnis Horizontal-Vertikalspannung der Wand aus hochkant liegenden Ballen zunächst kleiner ist als jenes der Wand aus flach liegenden Ballen.

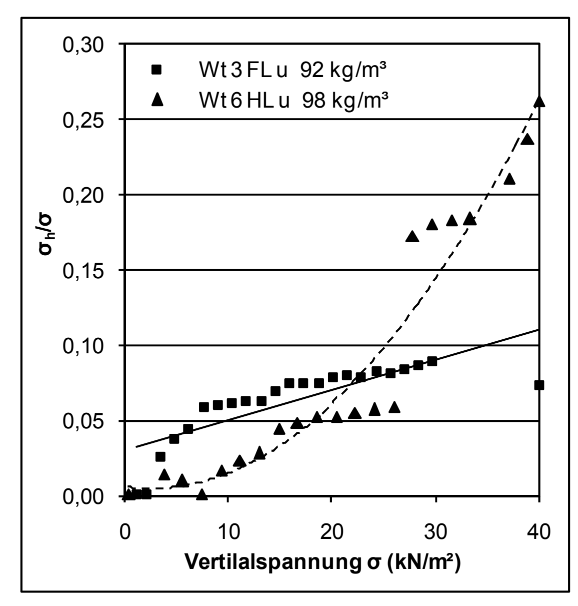


Abbildung 5.32: Verhältnis Horizontalspannung zu Vertikalspannung in Abhängigkeit von der Vertikalspannung bei den diskutierten Wänden

Dies kehrt sich bei einer Vertikalspannung zwischen 20 und 30 kN/m² um. Eine Erklärung hierfür kann sein, dass die Halme der hochkant stehenden Ballen ab dieser Spannung beginnen auszuknicken, die Last also selber nicht mehr abtragen können und sie vermehrt an die seitliche Begrenzung weitergeben. Bei einer Vertikalspannung 40 kN/m² stellt sich bei Wänden aus flach liegenden Ballen eine Horizontalspannung von ca. 5 kN/m² (12,5%), bei Wänden aus hochkant liegenden Ballen von ca. 11,6 kN/m² (26%) ein.

Die Horizontalspannung kann aus der Vertikalspannung wie folgt ermittelt werden (die Trockendichte der Wand findet dabei keine Berücksichtigung):

Wand aus flach liegenden HD-Weizenballen:

$$\sigma_{hFL} = 0{,}0025\,\sigma_{vFL}^{\;2} + 0{,}0244\,\sigma_{vFL} \quad R^2 = 0{,}81$$

Wand aus hochkant liegenden Weizenballen

$$\sigma_{hHL} = 0{,}0002 \cdot \sigma_{vHL}^{\;3} - 0{,}0009 \cdot \sigma_{vHL}^{\;2} + 0{,}0065 \cdot \sigma_{vHL}$$

$R^2 = 0{,}94$

Dabei ist:

σ_{hFL}: Horizontalspannung bei Wänden aus flach liegenden HD-Ballen (kN/m²)

σ_{vFL}: Vertikalspannung bei Wänden aus flach liegenden HD-Ballen (kN/m²)

σ_{hHL}: Horizontalspannung bei Wänden aus hochkant liegenden HD-Ballen (kN/m²)

σ_{vHL}: Vertikalspannung bei Wänden aus hochkant liegenden HD-Ballen (kN/m²)

5.9.4 Zum Relaxationsverhalten der untersuchten Wandkonstruktionen

Abbildung 5.33 zeigt das Relaxationsverhalten der untersuchten Wände bei einer Startspannung von 40 kN/m². Alle Kurven weisen hohe Schwankungen auf. Dies wird auf klimatische Einflüsse zurückgeführt. Alle Tests fanden im Außenklima statt. Ob das Klima die Messtechnik oder das Verhalten der Wand selbst beeinflusste, konnte nicht untersucht werden. Bei der verputzen Wand (Wandtest 7) liegt die Kennlinie aufgrund einer Fehlfunktion des Datenloggers nur unvollständig vor. Im Vergleich mit der unverputzten Wand gleicher Bauart, Wandtest 8, stellt sich heraus, dass die verputzte Wand einer höheren Relaxation unterliegt. Da der Putz am Wandfuß nicht auf dem lastabtragenden Leiterrahmen aufstand, wurde der Putz am Wandfuß indirekt belastet. Auch bei Einzelballen, bei denen der Putz indirekt belastet wurde, ist die Relaxation im Vergleich zum direkt belasteten Putz und zu unverputzten Ballen am höchsten, siehe Abschnitt 5.6.7

Bei den durch U-Profile seitlich begrenzten Wänden (Wt 5, 6, siehe Anhang II.2 Kapitel 8.5 und 8.6) weist die Wand aus flach liegenden Ballen (Wandtest 5) eine niedrigere Relaxation auf als die der hochkant liegenden Wand, deren Wert zeitweise unter 30% des Ausgangswertes liegt.

Der Grund für die Relaxationstests war die Ermittlung einer Vorspannung, die durch Relaxation nicht unter den Wert der Maximalspannung im späteren Belastungsfall fällt.

Unter der Prämisse, dass die Wände nach dem Vorspannen verputzt werden, wird aufgrund der vorliegenden Ergebnisse folgende Vorspannung für Maximalspannungen um 40 kN/m² empfohlen:

Für Strohballenwände aus flach liegenden Strohballen:

$$\sigma_V = \sigma_{\max} \cdot 2$$

Für Strohballenwände aus hochkant liegenden Strohballen:

$$\sigma_V = \sigma_{\max} \cdot 3$$

Dabei ist: σ_V: Vorspannung (kN/m²)

σ_{max}: Maximalspannung im Belastungsfall (kN/m²)

Für die Praxis stellt es sich praktikabler dar, anstatt einer Vorspannung eine Vorkomprimierung anzugeben. Für eine Maximalspannung im Belastungsfall von 20 kN/m² ergibt sich aus den Wandtests 5 und 6 (Wt 5, 6) und der oben genannten Empfehlungen für Wände aus flach liegenden Ballen eine Vorkompression von 12,01% und für Wände aus hochkant liegenden Ballen eine Vorkompression von 8,64% der Wandhöhe (entsprechend einer Vorspannung von ca. 40 kN/m² bei Wänden aus flach liegenden und ca. 60 kN/m² bei Wänden aus hochkant liegenden Strohballen).

Für Wände aus flach liegenden HD-Weizenballen ab einer Trockendichte von 92 kg/m³ wird vorgeschlagen:

$$\varepsilon_V = h_0 \cdot 14\%$$

Für Wände aus hochkant liegenden HD-Weizenballen ab einer Trockendichte von 98 kg/m³ wird vorgeschlagen:

$$\varepsilon_V = h_0 \cdot 10\%$$

Dabei ist:

ε_V: Vorkomprimierung (m)

h_0: Ausgangshöhe der Wand (m)

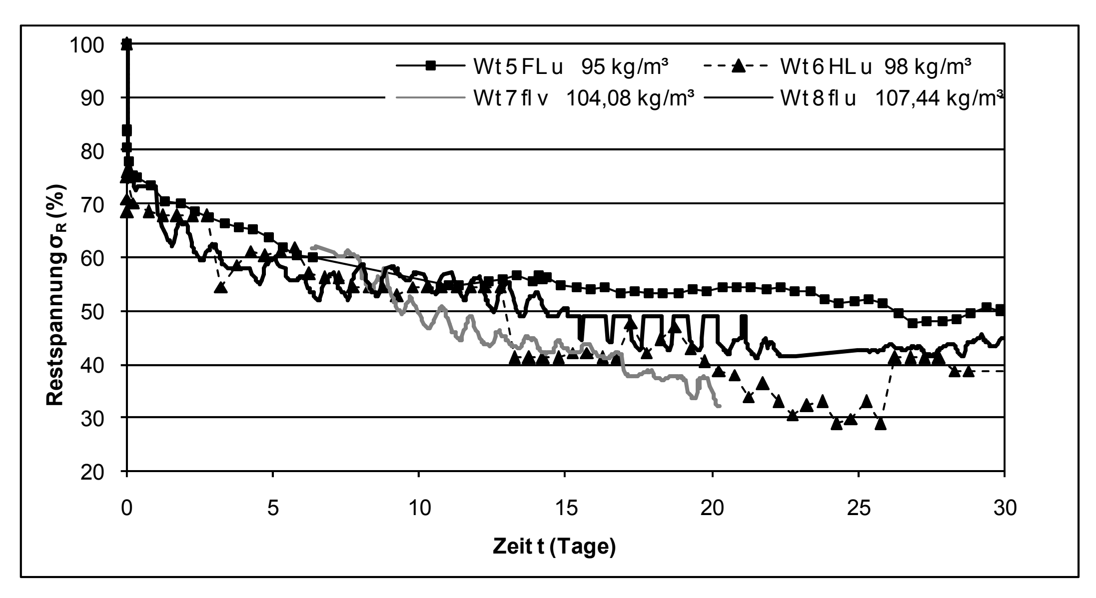


Abbildung 5.33: Relaxationsverhalten der untersuchten Wände bei einer Startspannung von 40 kN/m²

5.9.5 Zum Kraft-Verformungsverhalten unter Horizontallast der untersuchten Wände

Abbildung 5.34 zeigt das Verformungsverhalten der untersuchten Wände unter Horizontallast. Zu beachten ist, dass der Weg bei der unverputzten Wand in cm, bei der verputzten Wand in mm aufgetragen ist. Während sich die unverputzte Wand bei einer am Wandkopf aufgebrachten Horizontallast von ca. 5 kN/m² um 18 cm verformt, sind es bei der verputzten Wand bei 15 kN/m² nur ca. 6 mm. Bei dem Test der verputzten Wand verformte sich der Prüfrahmen stark, das der Druckzylinder mehrfach umgesetzt werden musste. Daraus folgt eine Entlastung und anschließende Wiederbelastung der Wand. Bei einer Verformung von ca. 18 mm kommt es zum Bruch des Putzes im Bereich der Lasteinleitung.

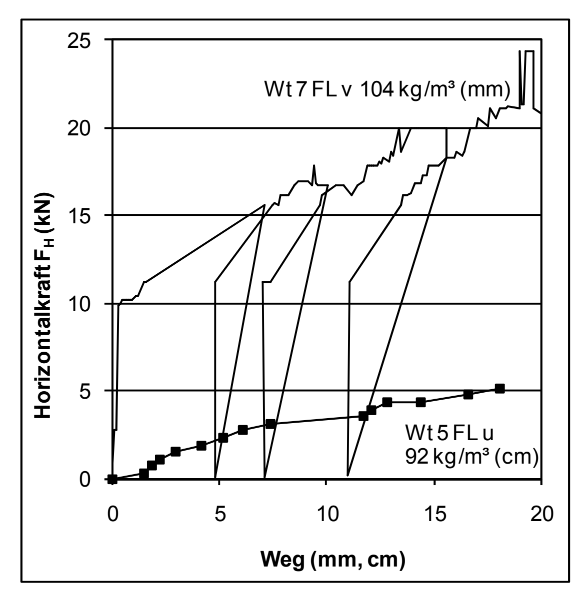


Abbildung 5.34: Verformungsverhalten der untersuchten Wände unter Horizontallast

5.10 Vergleich der elastomechanischen Eigenschaften von HD-Weizenballen und Wandkonstruktionen aus Strohballen

Das Testen von Wandkonstruktionen aus Strohballen ist aufwändig und teuer. In diesem Abschnitt soll geklärt werden, in wie weit von deutlich weniger aufwändigen und preiswerteren Tests an Einzelballen auf das Verhalten von Wandkonstruktionen geschlossen werden kann. Tabelle 5.20 zeigt die Kenndaten der zu vergleichenden Einzelballen und Wände.

Tabelle 5.20: Kennwerte der zu vergleichenden Einzelballen und Wände

Wand/Ballen	ρ_{tr} (kg/m³)	E-Modul	ε_p (%)	ε_{40} (%)	σ_{R24} (%)
Wt 3 fl u	92	312	-0,8	12,0	/
HD-W.Ballen fl	92	256	1,1	16,7	65,8
Wt 5 fl u	95	417	-0,8	8,8	72,1
HD-W.Ballen fl	95	261	1,1	16,4	66,2
Wt 6 hl u	98	661	-0,4	5,6	68,1
HD-W.Ballen fl	98	363	1,2	12,2	63,8

ρ_{tr}: Trockendichte; ε_{40}: Stauchung bei einer Spannung von 40 kN/m²; σ_{R24}: Restspannung nach 24 Stunden; fl: Ballen flach liegend; hl: Ballen hochkant liegend; u: unverputzt

5.10.1 Vergleich des Spannungs-Stauchungsverhaltens von einzelnen HD-Weizenballen und Wandkonstruktionen aus HD-Weizenballen

Verglichen werden die E-Module mit den dazugehörenden Nullpunktverschiebungen von unverputzten flach und hochkant liegenden HD-Weizenballen und den unverputzten Wänden aus flach liegenden HD-Weizenballen (Wt 3) und hochkant liegenden Weizenballen (Wt 6). Dabei wurden die E-Module und Nullpunktverschiebungen für die Einzelballen, wie unter 5.2.5 vorgeschlagen, für die Dichte der entsprechenden Strohballenwand ermittelt.

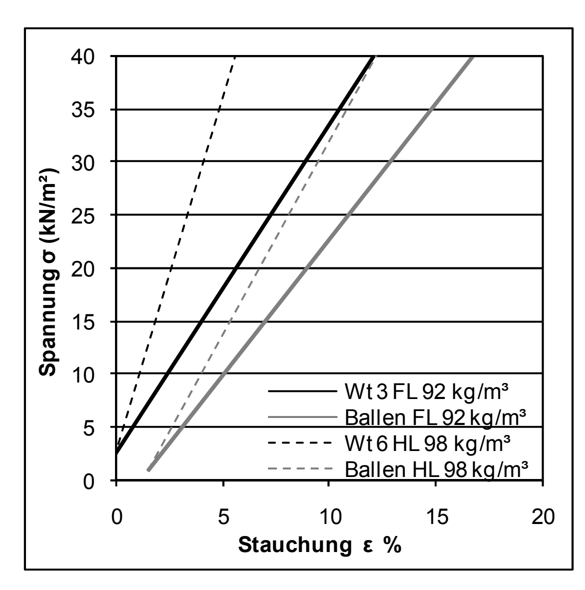


Abbildung 5.35: Vergleich der Elastizitätsmodule und Nullpunktverschiebungen bei unverputzten Einzelballen und Wänden aus Weizenstroh

Aus Abbildung 5.35 ist ersichtlich, dass die Nullpunktverschiebung beider Wände fast gleich ist, ebenso wie die Nullpunktverschiebung der Einzelballen beider Orientierungen. Die Nullpunktverschiebung der Einzelballen ist größer, die der Wände kleiner als Null. Das bedeutet, dass die Spannungs-Stauchungs-Kennlinie von Wänden im Gegensatz zu der von Einzelballen vor dem linearen Bereich einen steileren Verlauf aufweist als im linearen Bereich. Möglicherweise ist dies durch den Aufbau der Wand zu erklären, der eine Vorverdichtung bedingt.
Die Wandkonstruktionen weisen einen höheren Elastizitätsmodul auf als die jeweiligen Einzelballen. Dies entspricht den Erwartungen und kann mit der besseren Einspannung der Ballen in den Wänden als bei den Einzelballentests und einer Vorkomprimierung des Strohs durch den Wandaufbau begründet werden. Dabei ist der Unterschied im E-Modul zwischen hochkant liegenden Ballen und der Wand aus hochkant liegenden Ballen größer als der zwischen flach liegenden Ballen und der Wand aus flach liegenden Ballen, da bei der senkrechten Halmorientierung das Ausknicken der Halme in Ballenlängsrichtung durch die bessere Einspannung effektiver verhindert wird.

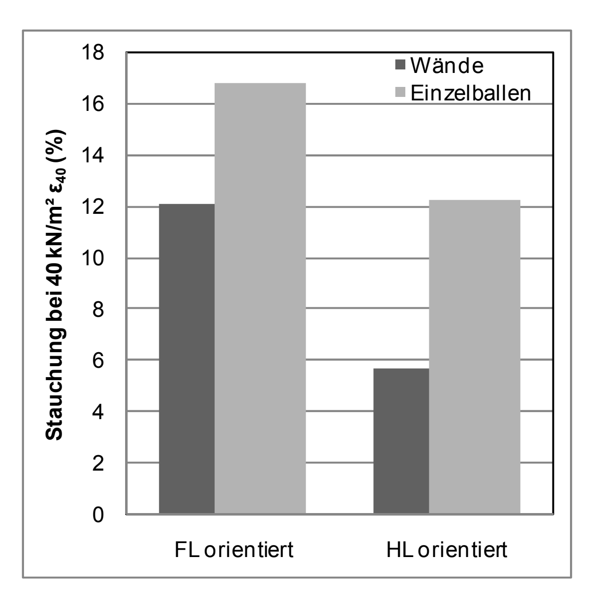


Abbildung 5.36: Stauchung bei 40 kN/m² der diskutierten HD-Weizenballen und Wandkonstruktionen aus flach- bzw. hochkant liegenden HD-Weizenballen

Abbildung 5.36 zeigt die stark unterschiedliche Stauchung bei einer Spannung von 40 kN/m² der diskutierten Wände und Einzelballen.
Das Verhältnis der ε_{40}-Werte der diskutierten Wände und Einzelballen gleicher Orientierung kann wie folgt beschrieben werden:

Wände aus flach liegenden HD-Weizenballen:

$$\varepsilon_{40WFL} = \varepsilon_{40BFL} \cdot 0{,}718$$

Wände aus hochkant liegenden HD-Weizenballen:

$$\varepsilon_{40WHL} = \varepsilon_{40BHL} \cdot 0{,}46$$

Dabei ist:

ε_{40WFL}: Stauchung der Wand aus flach liegenden Ballen bei einer Spannung von 40 kN/m²

ε_{40BFL}: Stauchung flach liegender Ballen bei einer Spannung von 40 kN/m²

ε_{40WHL}: Stauchung der Wand aus hochkant liegenden Ballen bei einer Spannung von 40 kN/m²

ε_{40BHL}: Stauchung hochkant liegender Ballen bei einer Spannung von 40 kN/m²

5.10.2 Vergleich des Relaxationsverhaltens von HD-Weizenballen und Wandkonstruktionen aus Strohballen

Aus Abbildung 5.37 ist ersichtlich, dass die Restspannung nach 24 Stunden der diskutierten Wände höher ist, als die der Einzelballen. Erklärt werden kann dies analog zu 5.10.1 (bessere Einspannung, Vorkomprimierung während des Wandaufbaus).

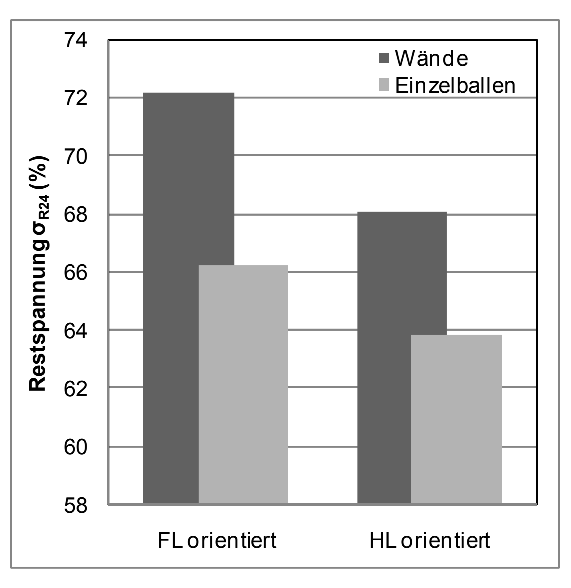


Abbildung 5.37: Restspannung nach 24 Stunden der diskutierten Wände und Einzelballen

Das Verhältnis der σ_{24}-Werte der diskutierten Wände und Einzelballen gleicher Orientierung kann wie folgt beschrieben werden:
Flach liegende Wände zu flach liegenden Einzelballen:

$$\sigma_{R24WFL} = \sigma_{R24BFL} \cdot 1{,}089$$

Hochkant liegende Wände zu hochkant liegenden Einzelballen:

$$\sigma_{R24WHL} = \sigma_{R24BHL} \cdot 1{,}067$$

Dabei ist:

σ_{R24WFL}: Restspannung der Wand aus flach liegenden Ballen nach 24 h

σ_{R24BFL}: Restspannung flach liegender Ballen nach 24 h

σ_{R24WHL}: Restspannung der Wand aus hochkant liegenden Ballen nach 24 h

σ_{R24BHL}: Restspannung hochkant liegender Ballen nach 24 h

6 Ausblick und Forschungsbedarf

Die im Rahmen dieser Dissertation gesammelten Erkenntnisse zum elastomechanischen Verhalten von Strohballen und Strohballenkonstruktionen können einen ersten Ansatz zur statischen Berechnung von lasttragenden Strohballenkonstruktionen bieten. Zur Verbesserung der Datenbasis wären folgende Untersuchungen wünschenswert:

- Weitere Tests an Ballen unterschiedlicher Stroharten. Dabei muss darauf geachtet werden, dass insbesondere die Erzeugungsbedingungen des Strohs und die Herstellung der Ballen vergleichbar sind. Aufgrund der großen Schwankungsbreite hinsichtlich der Dichte und der Abmessungen der Strohballen sollten pro Testreihe mindestens 10 Proben untersucht werden.
- Zur Validierung der Ergebnisse aus den Tests mit Wänden aus Strohballen wäre es wünschenswert diese zu wiederholen.
- Hinsichtlich der Vorfertigung von Wandelementen sollten Untersuchungen zum Aufbau solcher Elemente aufbauend auf den Versuchen mit U-Profilen zur seitlichen Begrenzung und Horizontalelementen zur Aussteifung durchgeführt werden. Dabei sollte in einer Variante auf Ballennägel verzichtet werden.

Teil III – Konstruktionen aus Strohballen

1 Zur historischen Entwicklung des Strohballenbaus

Laut den Recherchen von Minke/Mahlke (2004:10ff) und Gruber (2003:10ff) wurden die ersten Ballenbauten (zunächst nicht aus Stroh sondern aus Heu) bald nach der Entwicklung der Ballenpressen im zweiten Drittel des 19. Jahrhunderts in den holzarmen Gebieten Nebraskas errichtet. Vermutlich zunächst als Provisorium gedacht, dienten sie Landarbeitern als Unterkunft und stellten sich als dauerhaft und behaglich heraus. Aus diesen ersten Bauten entwickelte sich um die Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert der Nebraska Style. In dieser Bautechnik werden die Strohballen als lasttragendes Element eingesetzt, d.h. die Strohballen selbst tragen die Last des Daches in den Untergrund ab. Bei lasttragenden Strohballengebäuden ist es wichtig, dass die Lasten aus der Dachkonstruktion gleichmäßig auf alle Wände verteilt werden. Aus diesem Grund sind Pyramidendächer typisch für den Nebraska Style. Die Größe der Gebäude wird beim Nebraska Style durch die Tragfähigkeit der Strohballen begrenzt, die Häuser blieben vergleichsweise klein, vgl. Abbildung 1.1.



Abbildung 1.1: Burke House, 1903 im Nebraska-Style errichtet, seit 1956 nicht mehr bewohnt (Minke 2004:10)

In den zwanziger Jahren des letzten Jahrhunderts wurden größere und repräsentativere Bauten aus Strohballen errichtet. Bei diesen trugen im Gegensatz zum Nebraska Style nicht mehr nur die Strohballen die Last aus dem Dach, sondern zudem ein Holzständerwerk oder, wie bei dem Louis Gagné entwickelten Mortared-Bale Matrix System, auch Gagné-Technik genannt, Mörtelfugen zwischen den Ballen. Ein Beispiel für ein nicht lasttragendes Gebäude ist Burrit Mansion, siehe Abbildung 1.2, in Huntsville, Alabama, welches 1938 errichtet wurde und als eines der ersten zweigeschossigen Strohballengebäude der USA gilt. Heute ist das Gebäude als Museum der Öffentlichkeit zugänglich.

Mit dem Ende der Weltwirtschafskrise und der Entwicklung des industriellen Bauens Mitte der dreißiger Jahre des letzten Jahrhunderts wurde der Strohballenbau in die Bedeutungslosigkeit gedrängt.



Abbildung 1.2: Burrit Mansion, 1938 errichtet, heute Museum (Minke 2004:12)

Erst im Zuge der aus der 68er-Bewegung und der Ölkrise entstehenden Ökobewegung wurde der Strohballenbau wieder entdeckt. In den 70er und 80er Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts entstanden zahlreiche Publikationen, die zu einem kleinen Boom des Strohballenbaus in Nordamerika führten.

Auch in Europa wurden vereinzelt Strohballengebäude errichtet. So entstand 1921 im französischen Montargis das Maison Feuillete ein Holzständerbau mit Strohballenausfachung, der als ältestes Strohballengebäude Europas gilt. Aus dem Jahr 1944 ist ein Gebäude in den Niederlanden bekannt. In den 80er Jahren wurde in der damaligen DDR vorgeschlagen, Tierställe aus Strohballen zu erstellen (Gratz 1988: 126ff), siehe Abbildung 1.3. 1989 begann Barbara Jones mit dem Bau von Strohballenhäusern in Großbritannien und Irland.

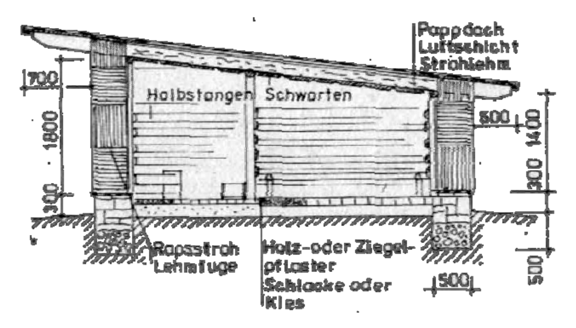


Abbildung 1.3: Tierstall in der ehemaligen DDR (Gratz 1988: 131)

Die Initialzündung für den aktuellen Strohballenbau in Europa brachte das erste internationale Strohballensymposium 1993. In Deutschland wurde 1995 das erste Strohballengebäude im Rahmen eines Workshops unter der

Leitung von Martin Oehlmann und Harald Wedig gebaut. 1998 fand ein erstes europäisches Strohballenbautreffen in der Bretagne mit über 50 Teilnehmern statt. 1999 und 2000 wurden in Deutschland den Strohballenpionieren Warmuth, Bönisch und Scharmer die ersten Baugenehmigungen für nicht lasttragende Strohballenhäuser erteilt. Im gleichen Jahr entstand an der Universität Kassel unter der Leitung von Gernot Minke ein lasttragendes Versuchsgebäude.

2002 wurde der Fachverband Strohballenbau im Ökodorf Sieben Linden gegründet. Geschäftsführender Vorsitzender wurde Dirk Scharmer. In der Folge wurden in Sieben Linden, das mit Recht als Mekka des deutschen Strohballenbaus bezeichnet werden kann, weitere Strohballenbauten errichtet. Darunter der komplett in Eigenleistung und ohne elektrische Werkzeuge errichtete Club 99, zwei kleine Kuppeln aus Strohballen und Strohpolis, ein 3-geschossiges Mehrfamilienhaus nach einem Entwurf von Dirk Scharmer, welches als größtes Strohballengebäude Deutschlands gilt, siehe Abbildung 1.4.

2004 wurde im Westerwald unter der Leitung von Gernot Minke eine nicht lasttragende Strohballenkuppel als Tonstudio errichtet, siehe Abbildung 1.5.

Im Februar 2006 erwirkte der Fachverband für Strohballenbau auf der Grundlage zahlreicher Tests eine erste bauaufsichtliche Zulassung für Baustrohballen. Im Sommer 2006 entstand in einem Workshop unter der Leitung von Gernot Minke und dem Verfasser ein nicht lasttragendes Strohballengewölbe in Bad Schussenried, (Abbildung 1.5). Im gleichen Sommer wurde im Rahmen der vorliegenden Dissertation ein selbsttragender Bogen aus Strohballen errichtet.




Abbildung 1.4: Club 99 (1) und Strohpolis (2) in Sieben Linden (Fotos: Scharmer)

Anfang 2007 wurde mit Stroh unlimited ltd. die erste Strohballenbaufirma in Deutschland gegründet.

Im Sommer 2007 wurden in einem weiteren Workshop unter der Leitung von Gernot Minke unter Mitwirkung des Verfassers drei selbsttragende Tonnengewölbe in Tamera/Portugal errichtet (Abbildung 1.5). Diese Bauweise erfordert es, jeden Ballen zweiseitig auf Gehrung zu schneiden. Die dazu verwendete Strohballensäge wurde im Rahmen der vorliegenden Dissertation entwickelt und hergestellt.





Abbildung 1.5: 1. Strohballenkuppel im Westerwald 2004 (Foto: Minke), 2. Nicht lasttragendes Strohballengewölbe Bad Schussenried 2006 (Foto: Frick), 3. Selbsttragende Strohballengewölbe in Tamera 2007

2 Zur Klassifizierung von Strohballenkonstruktionen

Prinzipiell können drei Arten von Strohballenkonstruktionen unterschieden werden:

1. Nicht lasttragende Systeme, bei welchen die Strohballen keine statische Funktion übernehmen,
2. Lasttragende Systeme, in denen ausschließlich Strohballen die statische Funktion übernehmen,
3. Hybride Systeme, bei denen Strohballen neben anderen statisch belasteten Bauteilen als tragendes Element eingesetzt werden.

Zu diesen drei Konstruktionsarten ist eine Vielzahl von Ausbildungen denkbar und möglich. Siehe dazu Abbildung 2.1.

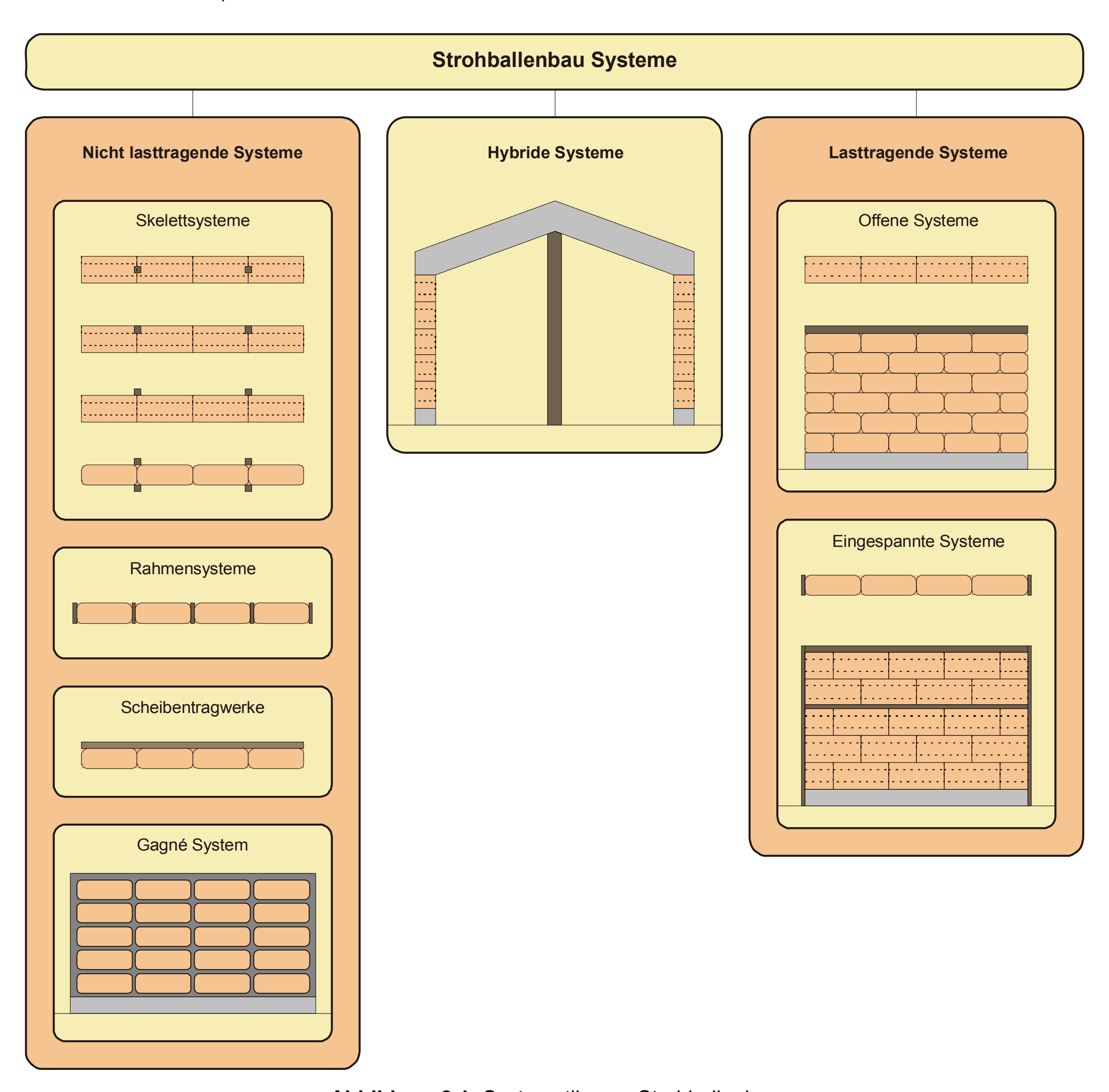


Abbildung 2.1: Systematik zum Strohballenbau

2.1 Nicht lasttragende Systeme

In nicht lasttragenden Strohballenbausystemen übernehmen additive Tragsysteme die statische Funktion. Die Strohballen fungieren als Wärmedämmung und in den meisten Fällen als Raumabschluss.
Nach der Art des eingesetzten Tragsystems lassen sich Skelett- und Rahmensysteme, das System Gagné und Scheibentragwerke unterscheiden.
In alle Systemen müssen die Ballen z.B. mittels Spanngurten, Wagenhebern oder anderen Hilfsmitteln vorkomprimiert werden, um nachträgliche Setzungen zu vermeiden. Eine Ausnahme stellt hier das System Gagné dar, bei dem dies nicht möglich ist.
Ein genereller Vorteil von nicht lasttragenden Systemen – mit Ausnahme des Systems Gagné – ist, dass das Dach vor dem Einbau der Ballen aufgeschlagen werden kann, die Witterungsabhängigkeit wird so deutlich verringert.

2.2 Lasttragende Systeme

In lasttragenden Systemen übernehmen die Strohballen sowohl statische als auch raumabschließende und wärmedämmende Funktionen.
War es bei nicht lasttragenden Systemen nötig, die Ballen in ihrer Einbausituation zu komprimieren, um spätere Setzungen durch das Eigengewicht der Ballen zu vermeiden, müssen lasttragende Systeme komprimiert werden, um Setzungen durch Eigenlast und Auflast (also Last aus dem Dach und evtl. einem weiteren Geschoss) auszuschließen. Das notwendige Maß der Komprimierung wurde in Teil II, *Elastomechanisches Verhalten von Strohballen und Strohballenwänden*, untersucht. Im Rahmen dieser Dissertation wurden prinzipielle Überlegungen zu Komprimierungssystemen vorgenommen. Diese sind in Anhang III.1, *Prinzipielle Überlegungen zu Vorspannsystemen für lasttragende Strohballenwände*, dargestellt.
Ein grundsätzlicher Nachteil von lasttragenden Systemen ist, dass das Dach erst errichtet werden kann, wenn die Wände fertig aufgebaut und komprimiert sind. So entsteht eine Witterungsabhängigkeit. Hochkant stehend verbaute Kleinballen eignen sich aufgrund ihres niedrigen E-Moduls nicht zum Aufbau lasttragender Strohballenwände.

2.3 Hybride Systeme

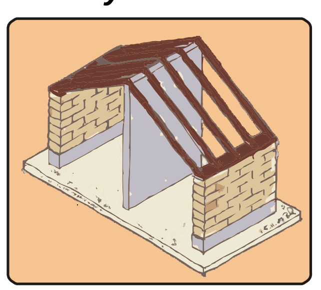


Abbildung 2.2: Prinzipskizze hybride Systeme

In hybriden Systemen (Abbildung 2.2) übernehmen lasttragende Systeme einen Teil der Lasten, ein anderer Teil wird von additiven Systemen abgetragen. Additive Systeme können z.B. Stützen oder tragende Innenwände sein.

Beispiele für hybride Systeme sind das Spiral-House von Amazon Nails in Irland, in dem der zentrale Kamin Lasten aus Geschossdecke und Dach übernimmt, oder das Haus im Disentis von Werner Schmidt, in dem Stützen in der verglasten Südfassade Teile der Dachlast abtragen, siehe Abbildung 2.3.





Abbildung 2.3: Beispiele für Gebäude mit Hybridkonstruktionen: Spiral-House (1) (Minke/Mahlke 2004: 93), Haus im Disentis (2) (Minke/Mahlke 2004: 102)

3 Beschreibung verschiedener Strohballenkonstruktionssysteme

Nachfolgend werden die in Abbildung 2.1 dargestellten Strohballenkonstruktionssysteme beschrieben. Dabei wird auf Tragkonstruktion, Lage und Einbau der Ballen, auf Aussteifungsmöglichkeiten gegen Horizontalkräfte und mögliche Bekleidungen eingegangen. Anhang III.2, *Zeichnerische Darstellung und Beschreibung der untersuchten Strohballenkonstruktionen*, enthält Konstruktionszeichnungen zu den verschiedenen Systemen. Eine Aussteifung durch Innenwände ist in allen Fällen möglich und wird daher nicht angeführt.

3.1 Skelettbausysteme

Skelettbausysteme sind nicht lasttragende Strohballenbausysteme. Das Skelett besteht in der Regel aus Holz, jedoch sind auch Materialien wie Beton, Stahlbeton, Stahl oder Bambus denkbar. Die Horizontalaussteifung kann durch biegesteife Anschlüsse, Einspannungen, diagonale Verstrebungen oder Innenwände erfolgen. Nach Kolb (1995: 108) sind bei Holzskeletten die Rastermaße (Stützenabstände) 1,2 m, 1,25 m, 3,6 m oder 4,8 m üblich.

Windrispenbänder und Plattenmaterial aus. Die Aussteifung ist also nur durch Einspannungen, biegesteife Anschlüsse oder Innenwände möglich.

Wandbekleidung: Als Wandbekleidung bietet sich innen wie außen ein mehrlagiger Putz an. Das Anbringen von Verschalungen erfordert eine Unterkonstruktion, die an der Wand selbst oder durch die Ballen in den Stützen zu fixieren ist.

3.1.1 Innenskelett

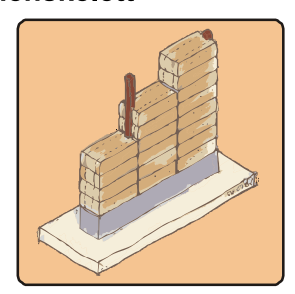


Abbildung 3.1: Prinzipskizze Innenskelett

Tragkonstruktion, Lage und Einbau der Ballen: Beim Innenskelett (Abbildung 3.1) liegen die lasttragenden Stützen innerhalb der Ballenebene. Die Ballen werden zur Aufnahme der Stützen ausgeklinkt. Das Ausklinken ist nur zwischen den Ballenbindungen möglich. Der Einsatz hochkant liegender Strohballen ist daher ausgeschlossen. Der Einbau stehender HD-Ballen ist nicht ratsam, da die Wand ohne weitere Aussteifungselemente zu instabil wird. Ein Verlegen der Strohballen im Verband ist zwischen den Stützen möglich. Da Stütze und Ballenende stets zusammenfallen, müssen eingesetzte Ballen häufig geteilt werden. Das häufige Teilen kann durch eine sorgfältige Ballenauswahl oder den Verzicht auf das Verlegen im Verband verringert werden. In diesem Fall müssen jedoch horizontale Versteifungselemente eingesetzt werden, um die Stabilität der Wand zu gewährleisten.

Horizontalaussteifung: Eine Aussteifung durch diagonale Verstrebungen ist nicht praktikabel, da alle Strohballen im auszusteifenden Feld entsprechend ausgeklinkt werden müssten. Ebenso scheidet die Aussteifung durch

3.1.2 Ballenbündiges Skelett (Bb Skelett)

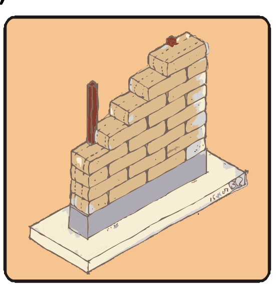


Abbildung 3.2: Prinzipskizze ballenbündiges Skelett

Tragkonstruktion, Lage und Einbau der Ballen: Beim ballenbündigen Skelett (Abbildung 3.2) liegen die lasttragenden Stützen bündig in der Ballenebene. Das Skelett kann sowohl an der Innen- als auch an der Außenseite der Wand angeordnet werden. Die Ballen müssen zur Aufnahme der Stützen ausgeklinkt werden. Da beim Ausklinken keine Ballenbindungen durchtrennt werden dürfen, ist der Einsatz hochkant liegender Strohballen ausgeschlossen. Stehende Strohballen sind evtl. möglich, machen aber eine horizontale Anbindung der Ballen an die Stützen nötig. Ein Verlegen der Strohballen im Verband ist möglich. Bei großen Stützweiten können auch hier Elemente zur Anbindung der Strohballen an die Stützen nötig werden.

Horizontalaussteifung: Die Aussteifung kann durch Windrispenbänder erfolgen. Denkbar sind auch diagonale Verstrebungen durch Aussparungen in den Ballen.

Wandbekleidung: Als Wandbekleidung bietet sich innen wie außen ein mehrlagiger Putz an.

Die Stützen sollten mit Putzträgern versehen werden. Das Anbringen außenliegender Verschalungen ist auf einer Unterkonstruktion, welche an den Strohballen oder den Stützen fixiert ist, möglich. Eine Anordnung des Skeletts an der Außenseite begünstigt das Anbringen einer Verschalung, bedingt jedoch Wärmebrücken bei der Einbindung der Decken- bzw. Dachkonstruktion.
Abbildung 3.3 zeigt ein Anwendungsbeispiel für das ballenbündige Skelett.




Abbildung 3.3: Beispiel ballenbündiges Skelett: Wohnhaus in Bösel, Architekt: Dirk Scharmer (Fotos: Dirk Scharmer)

3.1.3 Fugenorientiertes ballenbündiges Skelett (Fo bb Skelett)

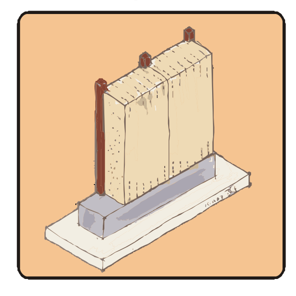


Abbildung 3.4: Prinzipskizze fugenorientiertes ballenbündiges Skelett

Tragkonstruktion, Lage und Einbau der Ballen: Das fugenorientierte ballenbündige Skelett (Abbildung 3.4) ist eine Variante des ballenbündigen Skelettes. Als raumabschließendes Element werden stehende Quaderballen (Abmessungen: 0,7m x1,2 m x1,0-2,7m) empfohlen. Anwendungen dieser Bauweise sind nicht bekannt. Die Idee dazu wurde im Rahmen dieser Dissertation entwickelt. Das Skelett kann sowohl an der Innen- als auch an der Außenseite der Ballen angeordnet werden. Die für eine Skelettkonstruktion relativ dicht stehenden Stützen werden im Raster der verwendeten Strohballen angeordnet. Die Ballen werden seitlich ausgeklinkt. Um die Strohballen in ihrer Lage zu sichern, wird eine Verbindung mit den Stützen nötig. Diese kann über eine Lattung, welche durch die Ballen mit den Stützen verbunden ist, hergestellt werden. Aufgrund der Ballenabmessungen ist bei diesem System ein erhöhter Maschineneinsatz erforderlich.
Horizontalaussteifung: Eine Aussteifung mittels Diagonalstreben in der Stützenebene ist wegen der Ballenschnürung ausgeschlossen. Möglich ist eine Aussteifung über Windrispenbänder oder Plattenmaterial bzw. Diagonalschalung.
Wandbekleidung: Mehrlagiger Lehmputz innen (im Bereich der Stützen auf Putzträger), Schalung außen auf der Lattung, welche die Ballen an die Stützen presst, oder mehrlagiger Putz.
Abbildung 3.5 zeigt einen Horizontalschnitt durch die vorgeschlagene Konstruktion.

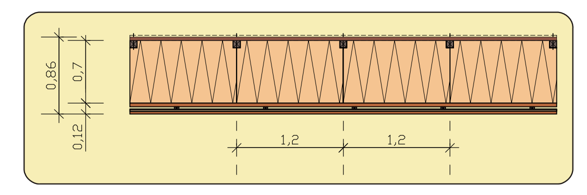


Abbildung 3.5: Horizontalschnitt durch die vorgeschlagene ballenbündige fugenorientierte Skelettkonstruktion: Aufbau von innen nach außen: Lehmputz, mehrlagig, 4 cm; Holzständer, 8/8 / Strohballen 70 cm; Lattung 4/6 / Lehmputz 1 cm; Konterlattung 3/5; Stülpschalung

3.1.4 Außenskelett

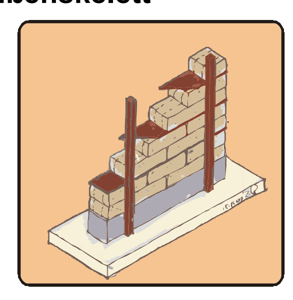


Abbildung 3.6: Prinzipskizze Außenskelett

Tragkonstruktion, Lage und Einbau der Ballen: Das Außenskelett (Abbildung 3.6, Beispiel Abbildung 3.7) kann auf der Innen- oder der Außenseite der Ballen angeordnet werden. In beiden Fällen sind Verbindungselemente zwischen Stützen und Ballenwand erforderlich. Diese werden in der Regel durch horizontal eingelegte Bohlen, welche mit den Stützen verbunden werden, realisiert. Die Ballen können flach- und hochkant liegend eingebaut werden. Aufgrund des geringeren Materialbedarfes und der geringeren Wandstärke bei gleichzeitig besserem U-Wert ist der Einbau hochkant liegender Ballen vorzuziehen.
Horizontalaussteifung: Über Diagonalstreben und Windrispenbänder.
Wandbekleidung: Putz. Alternativ kann eine Verschalung evtl. über die eingelegten Aussteifungselemente fixiert werden.



Abbildung 3.7: Beispiel Außenskelett: Club 99, Sieben Linden: Befestigung der Ballen in der Fußschwelle (1), Fixierung an den Stützen (2); Ansicht von Südwesten (3) (Fotos: Martin Stengel: 1, 2; Dirk Scharmer: 3)

3.1.5 Doppelskelett

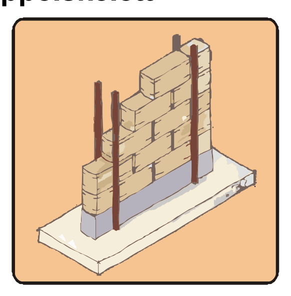


Abbildung 3.8: Prinzipskizze Doppelskelett

Tragkonstruktion, Lage und Einbau der Ballen: Beim Doppelskelett (Abbildung 3.8, Beispiel: Abbildung 3.9) sind die Stützen beidseitig der Strohballenwand angeordnet. Einbaubar sind Strohballen in allen Orientierungen. Da Wände aus hochkant liegenden Kleinballen trotz ihrer geringeren Dicke einen niedrigeren U-Wert aufweisen, sollte diese Orientierung, im Verband verlegt, verwendet werden.

Horizontalaussteifung: Durch Diagonalschalung, Windrispenbänder und bei geringen Rastermaßen durch Diagonalschalung oder Plattenmaterial.

Wandbekleidung: Bei geringen Rastermaßen (< 1,5 m) eignet sich diese Konstruktion hervorragend für die Anbringung einer Wetterschale. Das Verputzen ist wegen der außen liegenden Stützen aufwendiger.





Abbildung 3.9: Beispiel Doppelskelett: Waisenhaus bei Kaliningrad. Architekt: Gernot Minke. Einbau der Strohballen unterhalb einer Fensteröffnung (1), fertiges Gebäude (2) (Fotos: Minke)

3.2 Rahmensysteme

Tragkonstruktion, Lage und Einbau der Ballen: Holzrahmensysteme sind nicht lasttragende Systeme. Sie bestehen aus in der Regel ballenbreiten Stützen bzw. Stützelementen aus Bohlen, I-Trägern oder gedämmten Hohlprofilen aus Holzwerkstoffen, zukünftig evtl. auch aus Recycling- oder Biopolymerprofilen. Mineralische oder metallische Profile sind aufgrund ihrer hohen Wärmeleitfähigkeit ungeeignet. Die Rasterabstände betragen im klassischen Holzrahmenbau laut Kolb (1998: 88f) 62,5 cm oder 65,0 cm, im Strohballenbau bis zu einem Meter. Die Strohballen werden zwischen die Stützelemente hochkant liegend oder stehend eingefüllt und mittels Dreikantleisten fixiert. Rahmensysteme unterscheiden sich grundsätzlich von Skelettsystemen durch 1. geringere Stützenabstände, 2. Stützendimensionen (quadratische Stützen beim Skelettbau, rechteckige Stützen beim Rahmenbau), 3. kein Verlegen der Ballen im Verband bei Rahmensystemen.

Horizontalaussteifung: Aufgrund des geringen Rasterabstandes sind Rahmensysteme prädestiniert für Aussteifungen mit Plattenmaterial oder Diagonalschalungen.

Wandbekleidung: Das System eignet sich für eine Bekleidung mit Putzen ebenso gut wie zur Montage einer Verschalung.

Für Wände aus Strohballen mit einem bestimmten Wandaufbau in einer Rahmenkonstruktion mit einem Rasterabstand kleiner einem Meter liegt eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung vor.

3.2.1 Hochkant liegend verfüllte Rahmensysteme

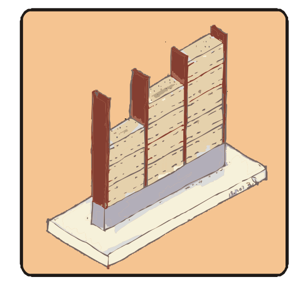


Abbildung 3.10: Prinzipskizze hochkant liegend verfüllte Rahmensystem

Bei hochkant liegend verfüllten Rahmensystemen (Abbildung 3.10, Beispiel: Abbildung 3.11) sind Ballenlänge und Rastermaß aufeinander

abgestimmt. Daher ist die Maßhaltigkeit der Ballen bei diesem System besonders wichtig. Ist die Maßhaltigkeit nicht gegeben, müssen zu lange Ballen entsprechend gekürzt werden. Im ungünstigsten Fall müssen bei diesem System bei einer Wandhöhe von 2,75 m pro Rahmen sechs Ballen gekürzt werden.





Abbildung 3.11: Beispiel hochkant liegend verfülltes Rahmensystem: Gebäude des NABU Leiferde. Architekt: Dirk Scharmer (Fotos und Fotomontage: Dirk Scharmer)

3.2.2 Stehend verfüllte Rahmensysteme

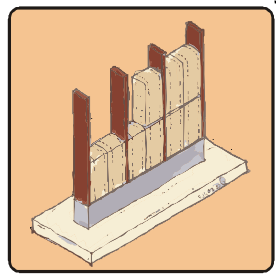


Abbildung 3.12: Prinzipskizze stehend verfülltes System

Der Hauptvorteil stehend verfüllter Rahmensysteme (Abbildung 3.12, Beispiel Abbildung 3.13) gegenüber hochkant liegend verfüllten Rahmensystemen ist, dass die Ballen in ihrer Länge weniger maßhaltig sein müssen. Pro Rahmen werden zwei stehende Ballen nebeneinander eingebaut. Wie oben beschrieben, sind die Ballen in ihrer Breite deutlich maßhaltiger als in ihrer Länge und passen daher zuverlässig in die Rahmen. Im ungünstigsten Fall müssen unabhängig von der Wandhöhe maximal zwei Ballen pro Feld gekürzt werden, wenn die Wandhöhe nicht mit den Ballenabmessungen in Übereinstimmung gebracht werden kann





Abbildung 3.13: Testwände in München (Wärmeleitfähigkeit) (1) und Holzkirchen (Bewitterung) (2) (Fotos: Dirk Scharmer)

3.3 *Scheibentragwerke*

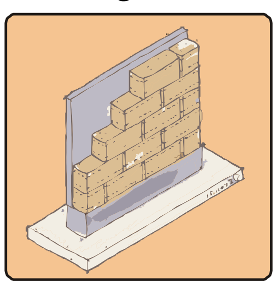


Abbildung 3.14: Prinzipskizze Scheibentragwerke

Tragkonstruktion, Lage und Einbau der Ballen: Unter die Kategorie Scheibentragwerke fallen alle Konstruktionen, bei denen die Strohballen lediglich der Wärmedämmung dienen. Statik und Raumabschluss werden von einer Scheibe übernommen, die z.B. aus Mauerwerk, Brettstapel- oder Kreuzlagenholz bestehen kann. Sinnvoller Weise wird diese Scheibe auf der Rauminnenseite angeordnet und übernimmt auch die Funktion der Luftdichtheitsebene und der **Horizontalaussteifung:** Die Strohballen müssen an der tragenden Scheibe befestigt werden, um Verformungen und ein Ablösen zu vermeiden. Eine herausragende Bedeutung könnte dieses System bei der energetischen Sanierung von Altbauten erlangen. Es ist diskussionswürdig, ob dieses System als Strohballenbausystem klassifiziert werden kann, oder ob nicht von einem Wärmedämmverbundsystem mit Strohballen gesprochen werden muss.

Wandbekleidung: Auch dieses System erfordert zum Anbringen einer Verschalung eine Unterkonstruktion, Putz kann direkt aufgetragen werden.

Abbildung 3.14 skizziert den prinzipiellen Aufbau des Systems, Abbildung 3.15 zeigt ein Beispiel.







Abbildung 3.15: Beispiel zu Scheibentragwerke: S-House in Österreich. Montage der Strohballen vor einer Kreuzlagenholzplatte (1, 2), Nordansicht des fertigen gebäudes (Wimmer/Hohensinner/Drack 2006: 72 (2), 73 (1), 108 (3))

3.4 System Gagné

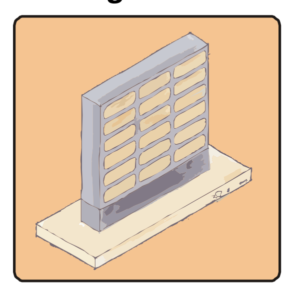


Abbildung 3.16: Prinzipskizze System Gagné

Tragkonstruktion, Lage und Einbau der Ballen: 1982 wurde diese Technik als „Mortared-Bale Matrix System“ von dem Kanadier Luis Gagné entwickelt. Die Ballen werden (traditionell flach liegend) ohne Verband aufgeschichtet, Stoß und Lagerfugen dick mit Zementmörtel verfugt (Abbildung 3.16). Nach Gruber (2003: 56) übernimmt das so entstehende Mörtelskelett sowohl die tragende Funktion als auch die Funktion der **Horizontalaussteifung**. Minke/Mahlke (2004:18) gehen hingegen davon aus, dass die Strohballen selbst teilweise Lasten übernehmen und bezeichnen die Gagné-Technik daher als hybrides System.
Wandbekleidung: Putz oder Schalung, befestigt auf Unterkonstruktion an den Mörtelfugen.

3.5 Offene lasttragende Systeme

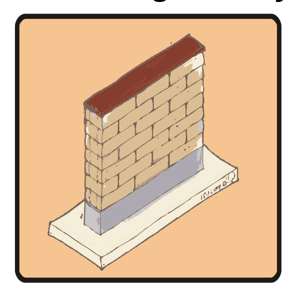


Abbildung 3.17: Prinzipskizze offenes System

Tragkonstruktion, Lage und Einbau der Ballen: Zu den offenen Systemen (Abbildung 3.17) gehört der in Abschnitt 1 beschriebene Nebraska Style, in dem die ersten Strohballenbauten errichtet wurden. Strohballen werden aufeinander gestapelt und mittels sogenannter Ballennägel verbunden. Auf den Wandkopf wird ein Ringbalken aufgelegt, der zum Aufbringen der Vorkomprimierung gegen das Fundament abgespannt wird. In den Vereinigten Staaten wurden zum Erstellen solcher Wände eine Fülle von Vorschriften, die sich wie Bauanleitungen lesen, in verschiedenen Building Codes abgelegt. Die fünf dem Verfasser bekannten Codes wurden im Rahmen dieser Dissertation übersetzt und zusammengefasst und sind in Anhang III.3, *US-Amerikaniche Straw Bale Building Codes*, vergleichend tabellarisch dargestellt. Aufgrund der günstigeren Knicklänge werden offene lasttragende Systeme in der Regel aus flach liegenden Ballen errichtet. Zur Ausbildung von Fenster- oder Türöffnungen werden mehr oder minder steif ausgebildete Holzrahmen eingesetzt, die über Ballennägel in den Laibungen verankert werden. Oberhalb der Fenster- bzw. Türstürze kann nur bedingt Last in die Wand eingeleitet werden. Auch hier geben die Building Codes Auskunft über Details.

Laut z.B. dem Californian Straw Bale Building Code dürfen Strohballenwände bis maximal ca. 19 kN/m² belastet werden. Eine Vorkomprimierung wird durch die Codes nicht vorgeschrieben, jedoch praktiziert. Empfohlen wird eine Vorkomprimierung von ca. 5% (King 2006). Die Ergebnisse dieser Dissertation zeigen eindeutig, dass eine Stauchung von 5% unter Berücksichtigung der Relaxation nicht ausreicht, um Setzungen durch Auflasten von 19 kN/m² zu verhindern. Der einschlägigen Literatur (vgl. King 2006) ist zu entnehmen, dass der Putz als statisches Element mit betrachtet wird: Strohballen und Putz bilden ein Sandwich-Element, bei dem die Strohballen als weicher Kern die harten Putzschalen zusammen halten und am Ausknicken hindern. Um die Funktion dieser Putzschalen sicher zu stellen, wird vorgeschlagen, selbige zu armieren. Dabei reichen die Hilfsmittel zur Armierung je nach Belastung der Wand von einfachen Faserzusätzen bis zu Estrichmatten, welche mit Drähten durch die Ballen verbunden werden. Überspitzt formuliert kann in diesem Fall eher von einer zweischaligen strohgefüllten Stahlbetonwand denn von einer lasttragenden Strohballenwand gesprochen werden. Jenseits der US-amerikanischen Normierungsversuche beweisen jedoch die vor annähernd 100 Jahren mit primitivsten Mitteln erstellte Strohballenbauten im Nebraska-Style, welche noch heute genutzt werden, die dauerhafte Gebrauchstauglichkeit dieses Konstruktionstyps.
Horizontalaussteifung: Bei den im Nebraska-Style errichteten Bauten erfolgte die Horizontalaussteifung durch die Putzschicht. Eine Aussteifung über Windrispenbänder ist möglich, solange die Vorspannung zur Aufnahme der H-Lasten ausreicht.

Wandbekleidung: Das Anbringen einer Verschalung erfordert eine Unterkonstruktion und ist daher aufwändiger als ein Verputzen.

Tonnengewölbe

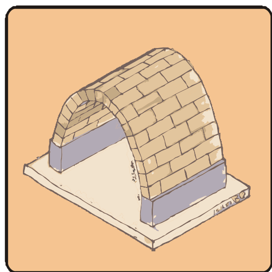


Abbildung 3.18: Prinzipskizze Tonnengewölbe

Tragkonstruktion, Lage und Einbau der Ballen: Im Sommer 2006 wurde im Rahmen dieser Dissertation erstmalig ein selbsttragender Bogen aus Strohballen auf dem Experimentiergelände des Forschungslabors für experimentelles Bauen der Uni Kassel errichtet (Abbildung 3.18, Abbildung 3.19). Der Bogen hatte die Form einer umgekehrten Kettenlinie. In Kettenlinien wirken ausschließlich Zugkräfte, in umgekehrten Kettenlinien (auch Stützlinien genannt) ausschließlich Druckkräfte.
Alle Ballen wurden mittels einer im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Strohballensäge nach vorher bestimmten Winkeln auf Gehrung geschnitten und über eine Schalung gelegt (2 in Abbildung 3.19). Die Schalung wurde entfernt und mittels eines Spanngurtes eine Vorkomprimierung hergestellt. Der Bogen erwies sich zunächst als sehr weich, gewann aber durch das Aufbringen einer dünnen Lehmschlämme deutlich an Stabilität.
Aufbauend auf den Erfahrungen mit diesem Bogen wurde die Säge verbessert (1 in Abbildung 3.20) und im September 2007 drei selbsttragende Strohballengewölbe in Tamera/Portugal während eines Workshops unter der Leitung von Gernot Minke unter Mitwirkung des Verfassers gebaut.
he Abbildung 3.20.

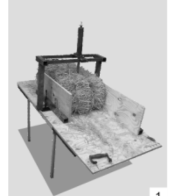





Abbildung 3.19: Selbsttragender Strohballenbogen: Säge (1), im Aufbau (2), ohne Schalung (3), mit Lehmschlämme (4)

Die Gewölbe beherbergen je einen Wohnraum, der Entwurf stammt von Professor Minke. Die mit einem Gründach abgedeckten Gewölbe besitzen eine ausreichende Stabilität. Der Aufbau ging auch mit den am Workshop teilnehmenden Laien problemlos vonstatten. An der Säge sind weitere Verbesserungen wünschenswert um die Präzision zu erhöhen und den Ballendurchsatz zu steigern.
Horizontalaussteifung: Eine Aussteifung ist, wenn nicht durch den Putz, nur durch zusätzliche Elemente, z.B. Innenwände möglich.
Wandbekleidung: Die Gewölbe wurden mit Verpackungsspannbändern komprimiert und beidseitig verputzt. Zum Anbringen einer Verschalung muss zunächst eine Unterkonstruktion aufgebracht werden.





Abbildung 3.20: Strohballensäge (1), legen der Ballen (2), gespanntes Gewölbe (3) (Fotos: Minke (1), Lipardi (2), Chrissafakis (3))

3.6 Eingespannte lasttragende Systeme

Das Merkmal eingespannter Systeme ist eine vierseitige Umschließung der Strohballen mit steifen Elementen. Auch wenn die vertikalen Teile dieser Einspannung nicht direkt zum Abtragen der Last herangezogen werden, stellen sie doch eine seitliche Begrenzung der entsprechenden Wandabschnitte dar, die durch die Behinderung der Querdehnung der Wand den E-Modul erhöht und die Relaxation verringert. Gleichzeitig bieten diese Elemente einen willkommenen Anschlusspunkt für Fenster- und Türrahmen. Dieses System wurde z.B. bei dem im Jahr 2000 errichteten Versuchsgebäude am Forschungslabor für Experimentelles Bauen, Uni Kassel, eingesetzt.

3.6.1 System Stroh unlimited

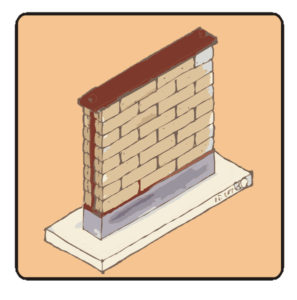


Abbildung 3.21: Prinzipskizze System Stroh unlimited

Tragkonstruktion, Lage und Einbau der Ballen: Das System Stroh unlimited (Abbildung 3.21, Beispiel: Abbildung 3.22) wurde von der gleichnamigen ersten deutschen Strohballenbaufirma entwickelt und in kleineren Bauten bereits mehrfach eingesetzt. Im Rahmen dieser Dissertation wurden ein verputztes und ein unverputztes Wandelement dieses Systems aufgebaut und getestet. Die Ergebnisse sind in Teil II, *Elastomechanisches Verhalten von Strohballen und Strohballenwänden,* und in Anhang III.2 dokumentiert. An den Enden eines Leiterrahmens aus Holz werden zwei Kanthölzer aufgerichtet. Der Zwischenraum wird im Verband mit flach liegenden Strohballen ausgefüllt, die im Bereich der Stützen ausgeklinkt werden müssen (die Ausklinkung schließt hochkant liegende Ballen wegen der Ballenbindung aus). Die Wand wird durch Ballennägel stabilisiert. Den oberen Abschluss bildet ein Ringbalken in Form einer Bohle oder eines Kastenträgers (verwindungssteife Konstruktion aus Kanthölzern und Plattenmaterial, auch als Boxbeam bezeichnet). Durch Aussparungen in der Bohle bzw. dem Kastenträger gleiten die wandbegrenzenden Kanthölzer. Die Wand wird durch Verpackungsbänder komprimiert. Die Verpackungsbänder wurden auf ihr Spannungs-Stauchungs- und Relaxationsverhalten hin untersucht.





Abbildung 3.22: Beispiel für das System Stroh unlimited: Gartenlaube Berlin. Architektin: Frederike Fuchs (Fotos: Fuchs)

Die Wand wurde durch die Verpackungsbänder um ca. 4% bis zu einer Spannung von etwa 13 kN/m² komprimiert. Den Regeln aus Teil II dieser Dissertation folgend, dürfte sie bis zu einer Spannung von 6,5 kN/m² belastet werden. Damit kann dieses System zum Erstellen kleinerer Gebäude wie Lauben, Gartenhütten oder Schuppen angewendet werden. Durch das Aufbringen einer höheren Vorspannung, z.B. durch andere Spannbänder oder additive Vorspannsysteme, könnte der Einsatzbereich dieses Systems erweitert werden. Die verputzte Wand hielt bei Belastungstests Spannungen von über 40 kN/m² problemlos stand. Diese Stabilität ist der lastabtragenden Wirkung des Putzes zuzuschreiben, die in Deutschland nicht berücksichtigt werden darf.
Horizontalaussteifung: Aussteifung über Windrispenbänder ist möglich, solange die Vorspannung zur Aufnahme der H-Lasten ausreicht.
Wandbekleidung: Das Anbringen einer Verschalung erfordert eine Unterkonstruktion und ist daher aufwändiger als ein Verputzen.

3.6.2 System E+

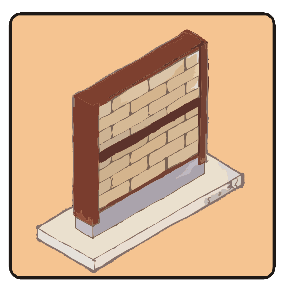


Abbildung 3.23: Prinzipskizze System E^+

Tragkonstruktion, Lage und Einbau der Ballen: Beim System E^+ (Abbildung 3.23, Abbildung 3.24), welches im Rahmen dieser Dissertation entwickelt wurde, werden die Wandelemente durch U-Profile aus Holzwerkstoffen seitlich begrenzt. Ein horizontaler Leiterrahmen in der der Wand nimmt zum einem durch die Vorkomprimierung entstehende Kräfte auf die seitlichen Begrenzungen auf und wirkt zum anderen aussteifend auf die Konstruktion, wodurch die Stabilität gegen Beulen in Kombination mit den U-Profilen deutlich verbessert wird. Außerdem bietet der horizontale Leiterrahmen die Möglichkeit, eine Verschalung anzuschließen.
Die U-Profile ermöglichen beim Aufbau ein Eindrücken der Ballen in die Wand. Dadurch wird eine horizontale Vorkomprimierung erreicht und die Toleranz gegenüber variierenden Ballenlängen erhöht, eine Tatsache, die wesentlich zum effizienten Aufbau der Wandelemente beiträgt.
Das System ist so angelegt, dass es in elementierter Form vorgefertigt werden kann. Diese Möglichkeit trägt einerseits zu einer weiteren Effizienzsteigerung beim Wandaufbau bei und reduziert andererseits die Witterungsabhängigkeit beim Aufbau. Auf diese Weise wird eine höhere Vorspannung, aufgebracht durch eine stationäre Anlage, möglich. Um die Vorspannung zu halten, werden Bodenrahmen, U-Profile und Ringbalken kraftschlüssig miteinander verbunden. Gegebenenfalls können je nach Länge des Elementes vertikale Zugelemente zur Vermeidung von Durchbiegungen des Bodenrahmens und des Ringbalkens ergänzt werden. Strohballen können flach und hochkant liegend eingebaut werden. Der hochkant liegende Einbau wird wegen der günstigeren Wärmedämmung bei geringerem Materialeinsatz empfohlen. Für das System E^+ wird analog zu dem in den US-amerikanische

Building Codes eine maximale Gebrauchsspannung von 20 kN/m² empfohlen. Nach den in Teil II dieser Dissertation gewonnenen Erkenntnissen sollten Wände aus hochkant liegenden Ballen für eine Gebrauchsspannung von 20 kN/m² mit einer Spannung von 60 kN/m², entsprechend einer Stauchung von ca. 10%, Wände aus flach liegenden Ballen bis mit einer Spannung von 40 kN/m², entsprechend einer Stauchung von ca. 14% vorgespannt werden um spätere Setzungen auszuschließen.
Eine **Horizontalaussteifung** kann über Platten bzw. Diagonalverschalung oder Windrispenbänder erfolgen.

Als **Wandbekleidung** ist Putz oder an den Horizontalelementen befestigte Verkleidung möglich.

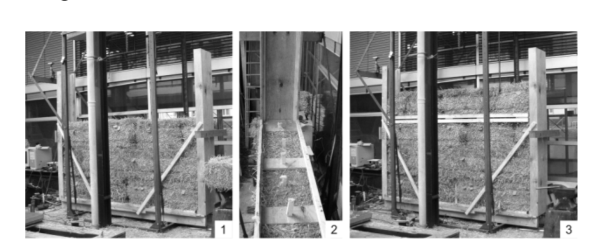


Abbildung 3.24: Aufbau einer Testwand im System E^+

4 Untersuchungen zu den dargestellten Strohballenkonstruktionssystemen

4.1 Zum Primärenergieinhalt der untersuchten Strohballenkonstruktionen

4.1.1 Methode

Der Primärenergieinhalt (PEI) von Strohballen wurde in Teil I dieser Dissertation ermittelt. Der Primärenergieinhalt der beschriebenen Strohballenkonstruktionen umfasst die Primärenergie, die zur Herstellung der in der jeweiligen Konstruktion verwendeten Materialien aufgewendet wurde: Stroh, Holz, Putzträger, Putz, Befestigungs- und Verbindungsmittel sowie weitere Materialien. Nicht enthalten ist der Energieaufwand für den eigentlichen Aufbau der Wand auf der Baustelle.
Zur Ermittlung des Primärenergieinhaltes von Strohballenkonstruktionen wurden Wandelemente von ca. 5 m Länge und 2,75 m Höhe herangezogen. Die Dimensionierung der tragenden Bauteile erfolgte (so nicht anders angegeben) für eine Linienlast von 7,2 kN/m entsprechend der maximalen Tragfähigkeit einer 36 cm dicken lasttragenden Strohballenwand (σ_{max}=20 kN/m²).
Die Mengen und Primärenergieinhalte aller zum Aufbau der Wand benötigten Materialien wurden ermittelt und aufsummiert. Diese Summe wurde anschließend durch die Wandfläche dividiert. Der Primärenergieinhalt der Wände wird in kWh/m² Wandfläche angegeben.
In der Darstellung und Diskussion der Ergebnisse werden die Kategorien Holzteile, Stahlteile, Stroh, Putz und Sonstiges unterschieden. In „Holzteile“ sind alle benötigten Holzteile für die Konstruktion und evtl. die Verschalung enthalten. „Stahlteile“ umfasst alle Verbindungs- und Befestigungsmittel aus Stahl. Unter „Putz“ sind die Primärenergieinhalte der Putzschichten (falls nicht anders angegeben Lehmputz) aufsummiert. „Sonstiges“ enthält z.B. Putzträger, Baupapiere und zusätzliche Dämmungen.
Detaillierte Angaben zu den verwendeten Materialien und deren Primärenergieinhalten sowie die beispielhafte Berechnung von Primärenergieinhalten der Konstruktionen sind in Anhang III.4, *Zu den Primärenergieinhalten der untersuchten Strohballenkonstruktionen*, abgelegt.

4.1.2 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse

Vergleich der Primärenergieinhalte der unterschiedlichen Strohballenkonstruktionssysteme
Verglichen werden Strohballenkonstruktionssysteme mit Lehmputz innen und Schalung außen. Wenn die Konstruktion dies zuließ, wurden hochkant liegende oder stehende Ballen verwendet. Bei dem fugenorientierten ballenbündigen Skelett (Fo bb. Skelett) kamen 70 cm dicke, stehende Q-Ballen zum Einsatz. Abbildung 4.1 visualisiert die Ergebnisse der Berechnungen. Detaillierte Angaben und Zeichnungen zu den untersuchten Konstruktionen enthält Anhang III.2, *Zeichnerische Darstellung und Beschreibung der untersuchten Strohballenkonstruktionen*.
Den niedrigsten Primärenergieinhalt weist mit 35 kWh/m² das lasttragende Strohballengewölbe (Gewölbe) auf. Für dieses System werden nur für die Verschalung Holz- und Stahlteile benötigt. Da keine Putzträger oder zusätzliche Dämmungen benötigt werden, ist auch der Primärenergieinhalt der unter „Sonstiges“ zusammengefassten Bauteile gering.

Unter den Wandkonstruktionen schneidet das Doppelskelett mit 47,2 kWh/m² am besten ab, dicht gefolgt vom fugenorientierten, ballenbündigen Skelett (fo bb Skelett) mit einem Primärenergieinhalt von 49 KWh/m². Dabei muss angemerkt werden, dass bei letzterem Q-Ballen mit der doppelten Dicke der beim Doppelskelett eingesetzten Kleinballen verwendet wurden. Während beim fo bb Skelett weniger Holz gebraucht wird, kommt das Doppelskelett mit weniger Putz aus, da dieser im Bereich der außen liegenden Stützen nicht aufgetragen wird.
Den höchsten Primärenergieinhalt weist das Rahmensystem nach der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung für Baustrohballen (Rahmen AbZ) mit 96 kWh/m² auf. Zu dem relativ hohen Holzanteil des Rahmensystems kommt eine Verschalung mit OSB-Platten auf der Innenseite der Konstruktion. Auf der Außenseite wird eine Holzweichfaserplatte benötigt, deren PEI in „Sonstiges" eingeht.
Einen ebenfalls hohen Primärenergieinhalt weisen das Scheibentragwerk aufgrund der großen Holzmasse der massiven Innenschale und das System Gagné, verursacht durch den hohen Mörtelanteil (unter „Sonstiges") der Konstruktion, auf.

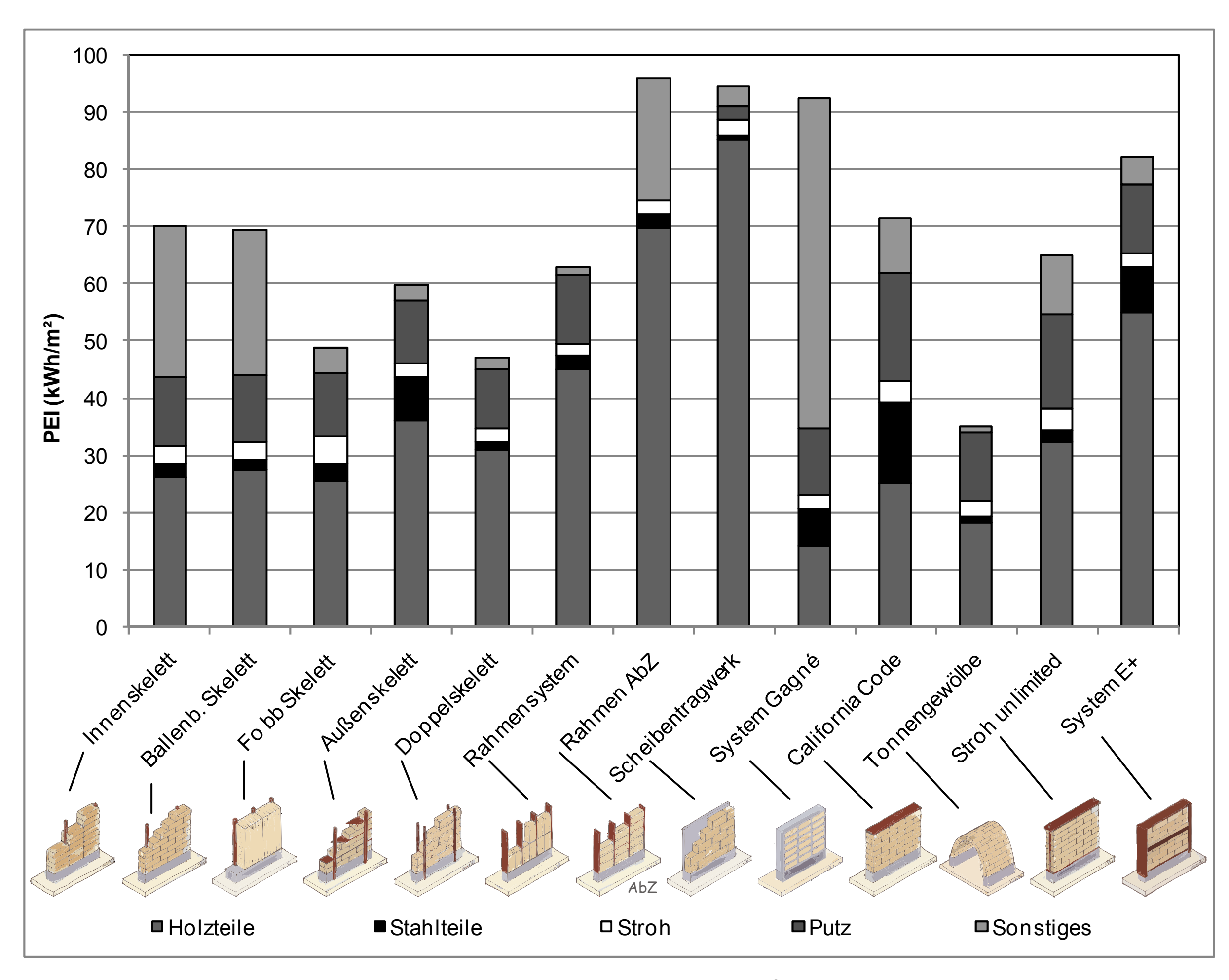


Abbildung 4.1: Primärenergieinhalte der untersuchten Strohballenkonstruktionen

Beim Innenskelett und beim ballenbündigen Skelett wird eine zusätzliche Dämmung der Pfetten aus Holzweichfaserplatten benötigt, die für den hohen Anteil der Kategorie „Sonstiges" verantwortlich sind. Wegen der nötigen Abbrandmassen freistehender Holzkonstruktionen ist der Holzanteil am Primärenergieinhalt des Außenskelettes erhöht.
Mit Ausnahme des Gewölbes fällt der Primärenergieinhalt der lasttragenden Konstruktionen unerwartet hoch aus. Aufgrund der benötigten Ringanker und Aussteifungselemente ist der Anteil der Holzelemente am PEI bei den Systemen Stroh unlimited und E+ deutlich höher als der vieler nicht lasttragender Systeme. Der erhöhte Einsatz von Stahlteilen bei „California Code" und beim System E^+ treibt den Primärenergieinhalt zusätzlich in die Höhe.
Es muss festgestellt werden, dass – entgegen ursprünglicher Annahmen des Verfassers – der Primärenergiebedarf von lasttragenden Systemen mit Ausnahme von Gewölbekonstruktionen höher ist als bei der Mehrzahl der nicht lasttragenden Systeme.

Vergleich der Primärenergieinhalte von Strohballenkonstruktionen und konventionellen Konstruktionen

Abbildung 4.2 zeigt den geringeren Primärenergieinhalt einer mit Strohballen verfüllten Holzrahmenkonstruktion im Vergleich zu einer mit Mineralwolle gedämmten Konstruktion und eines Wärmedämmverbundsystems. Bei diesem Vergleich wird von gleichen U-Werten der Konstruktionen ausgegangen.

Deutlich ist zu erkennen, dass der Dämmstoff die Hauptunterschiede zwischen den Konstruktionen ausmacht. Während die Strohballen bei der Strohballenkonstruktion praktisch nicht ins Gewicht fallen, macht der Anteil des Dämmstoffes bei der mit Mineralwolle gedämmten Konstruktion über die Hälfte des Primärenergiebedarfes aus. Der höhere PEI der Tragkonstruktion von „Holzrahmen Mineralwolle“ gegenüber „Holzrahmen Strohballen“ resultiert aus der Beplankung der Holzrahmenkonstruktion, die nötig ist, um die Mineralwolle in der Wand zu fixieren. Einen noch höheren Primärenergiebedarf weisen die Kalksandsteine in der Tragkonstruktion des Wärmedämmverbundsystems auf. Für den hohen Anteil von „Sonstiges“ ist im Fall des Wärmeverbundsystems der zum Fixieren der EPS-Platten eingesetzte mineralische Kleber verantwortlich.

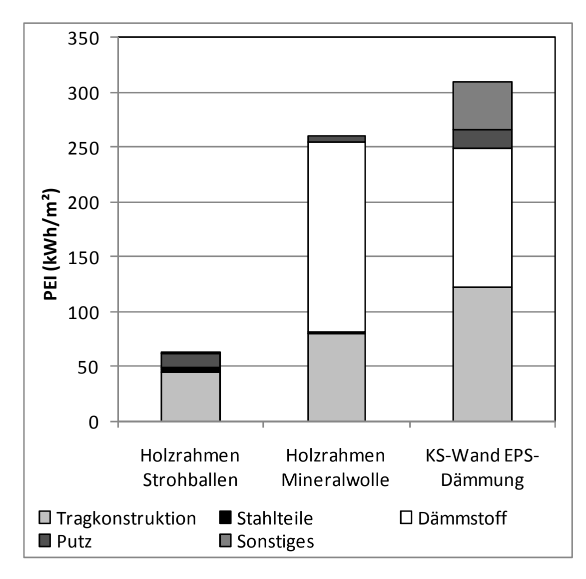


Abbildung 4.2: Vergleich der Primärenergieinhalte von Strohballen- und konventionellen Wänden bei gleichen Wärmedurchgangskoeffizienten ohne Berücksichtigung von Sockel und Fundament

Einfluss des Bekleidungssystems auf den Primärenergieinhalt von Strohballenkonstruktionen

Am Beispiel des Rahmensystems und des Innenskelettes wurden die Unterschiede im Primärenergieinhalt von Strohballenkonstruktionen mit Lehmputz auf der Innen- und einer Stülpschalung auf der Außenseite mit beidseitig verputzten Konstruktionen untersucht. Dabei zeigte sich, dass der Primärenergieinhalt einer Verschalung höher ist als der einer 3 cm starken Lehmputzschicht. Dieser Effekt ist unabhängig davon, ob zur Befestigung der Schale eine extra Unterkonstruktion (beim Innenskelett) gebraucht wird oder nicht (Rahmensystem). Jedoch fällt der Unterschied zwischen verputzter und verkleideter Konstruktion bei dem Innenskelett, welches eine Unterkonstruktion zum Anbringen der Schalung benötigt, mit ca. 11 kWh/m² höher aus als beim Rahmensystem mit ca. 8 kWh/m², welches diese Unterkonstruktion nicht benötigt.

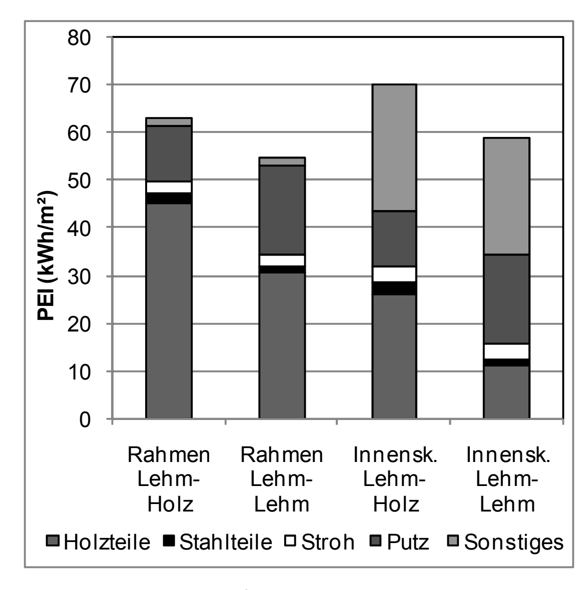


Abbildung 4.3: Einfluss des Bekleidungssystems auf den Primärenergieinhalt

Einfluss der Putzart auf den Primärenergieinhalt von Strohballenkonstruktionen am Beispiel des Rahmensystems

Verglichen werden auf der Innenseite mit Lehm verputzte Rahmenkonstruktionen, bei denen die Außenbekleidung variiert wird. Variationen sind Lehmputz, Kalkputz, Zementputz und eine Stülpschalung. Abbildung 4.4 zeigt, dass der Primärenergieinhalt der mit Kalk bzw. Zement verputzten Konstruktionen deutlich höher liegt als der mit Lehm verputzten Konstruktion. Dabei liegt der Mehrbedarf an Primärenergie für den Putz schon beim Kalk über dem Mehrbedarf für eine Holzschalung.

Einfluss der Dämmstoffdicke bzw. des U-Wertes auf den Primärenergieinhalt von Strohballenkonstruktionen im Vergleich mit einer konventionellen Konstruktion

Verglichen werden die Primärenergieinhalte des fugenorientierten ballenbündigen Skeletts (Fo bb) und des Systems E^+ mit einem Wärmedämmverbundsystem in Abhängigkeit vom

Wärmedurchgangskoeffizienten. Bei den Strohballenkonstruktionen werden die Dämmstoffdicken entsprechend der verfügbaren Strohballenabmessungen variiert. Die U-Werte des Wärmedämmverbundsystems entsprechen dabei denen des Systems E^+ bei den verschiedenen Dämmstoffdicken (E^+ 36 cm U=0,14 W/(m²K); E^+ 70 cm U=0,08 W/(m²K); E^+ 90 cm U=0,06 W/(m²K); E^+ 130 cm U=0,04 W/(m²K)). Die Strohballensysteme sind dabei für eine Last ausgelegt, die einer Spannung von 20 kN/m² bei der jeweiligen Wanddicke entsprechen.

Während aus Abbildung 4.5 der Anstieg des Primärenergieinhaltes beim fugenorientierten ballenbündigen Skelett kaum sichtbar ist, wird dieser beim System E^+ durch einen größeren Materialaufwand der oberen und unteren Lasteinleitungsplatten um etwa 30% bei der Senkung des U-Wertes von 0,14 auf 0,04 kWh/(m²K) deutlich. Jedoch bleibt der Anstieg gegenüber dem Wärmedammverbundsystem gering. Hier wurde eine Steigerung von über 100% bei der gleichen Senkung des U-Wertes berechnet.

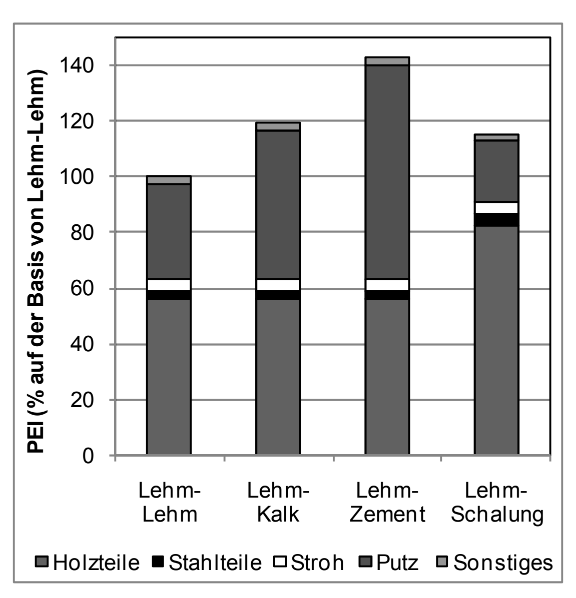


Abbildung 4.4: Einfluss der Putzart im Vergleich mit dem Bekleidungssystems auf den Primärenergieinhalt des Rahmensystems

Bei etwa gleichem U-Wert von ca. 0,04 W/(m²K) liegt der Primärenergieinhalt des fugenorientierten ballenbündigen Skeletts bei nur einem Elftel des Primärenergieinhaltes des Wärmedämmverbundsystems,

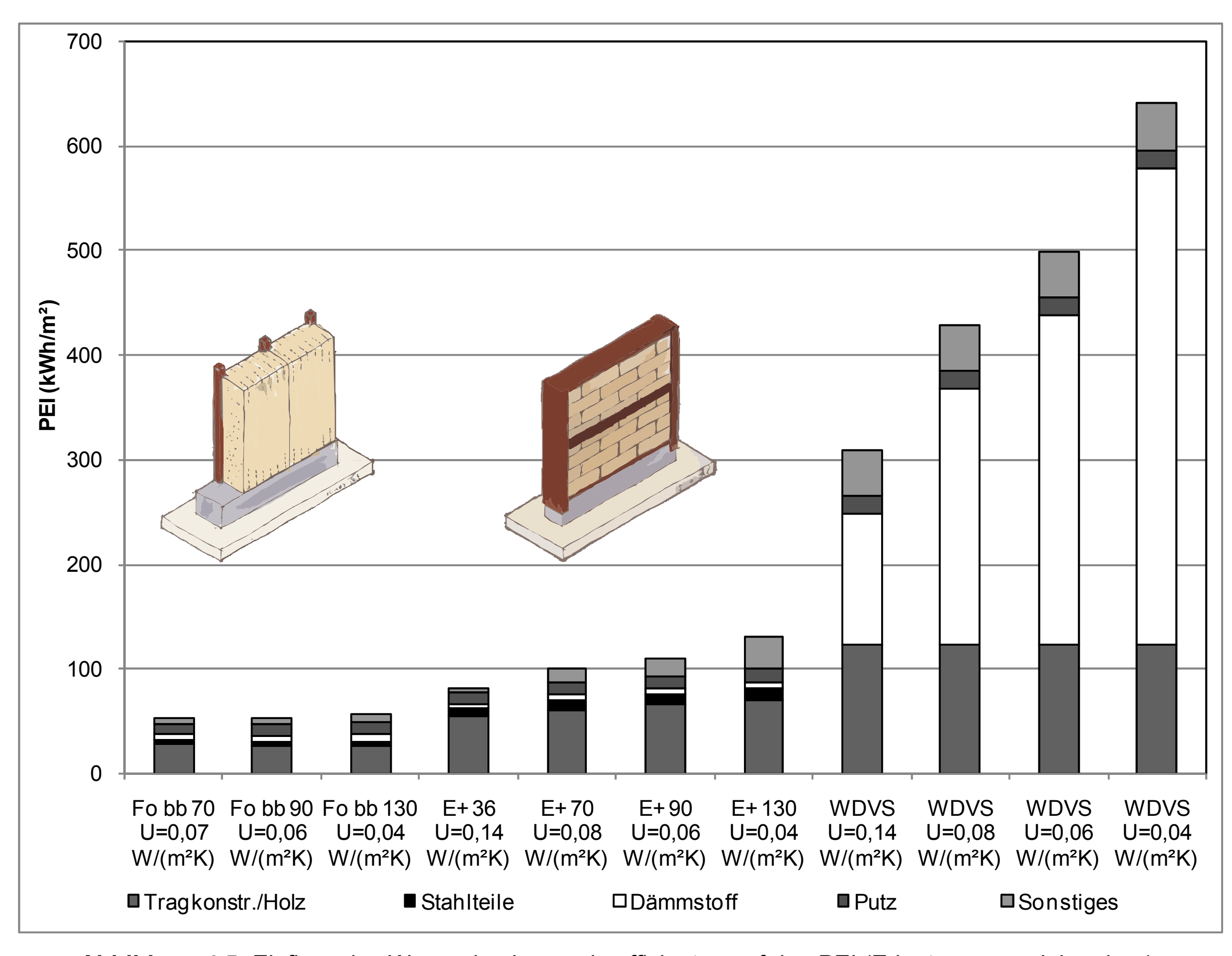


Abbildung 4.5: Einfluss des Wärmedurchgangskoeffizienten auf den PEI (Erläuterungen siehe oben)

4.2 *Zum Wärmedurchgangskoeffizienten der untersuchten Strohballenkonstruktionen*

4.2.1 Methode

Der Wärmedurchgangskoeffizient U (W/(m²K) der untersuchten Konstruktionen ist der Kehrwert des Wärmedurchgangswiderstandes R_T (m²K/W):

$$U = \frac{1}{R_T}$$

Der Wärmedurchgangswiderstand R_T (m²K/W) mehrschichtiger homogener Konstruktionen wurde nach folgender Gleichung berechnet:

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + ... + R_n + R_{se}$$

Dabei ist:

R_{si}: Wärmeübergangswiderstand innen

R_1-R_n: Wärmedurchgangswiderstand der jeweiligen Schicht

R_{se}: Wärmeübergangswiderstand außen

Der Wärmedurchgangswiderstand R_T (m²K/W) mehrschichtiger inhomogener Konstruktionen wurde nach DIN EN ISO 6946 berechnet. Das dort zur Verfügung gestellte Verfahren ist ein Näherungsverfahren. Wenn Bauteile mit deutlich unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten nebeneinanderliegen, ist mit signifikanten Fehlern hin zu niedrigeren R_T- Werten zu rechnen (z.B. bei der Gagné-Technik):

$$R_T = \frac{R_T^{'} + R_T^{''}}{2}$$

Dabei ist:

R_T‘: Oberer Grenzwert des Wärmedurchgangswiderstandes

R_T“: Unterer Grenzwert des Wärmedurchgangswiderstandes.

Details siehe Anhang III.5, *Zu den Wärmedurchgangskoeffizienten der untersuchten Strohballenkonstruktionen*.

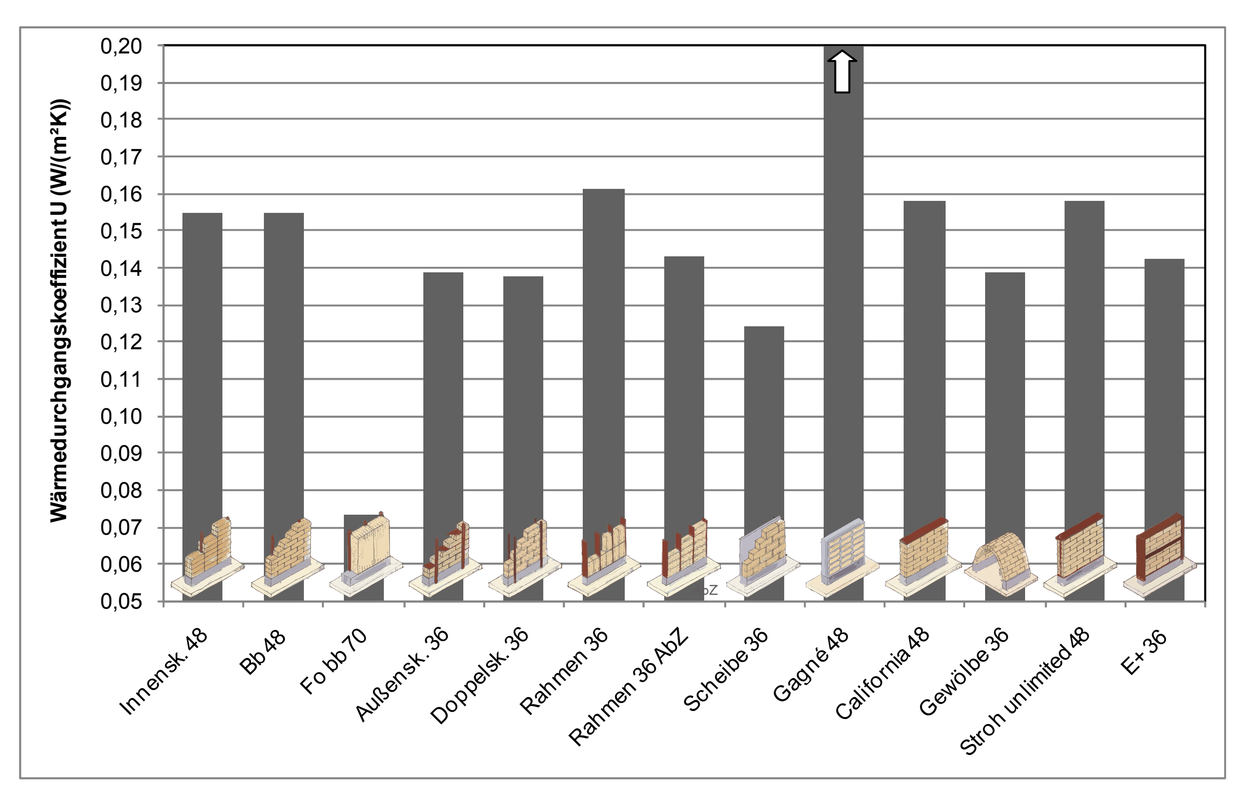


Abbildung 4.6: Wärmedurchgangskoeffizienten der untersuchten Konstruktionen

4.2.2 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse

Abbildung 4.6 visualisiert die Wärmedurchgangskoeffizienten der untersuchten Konstruktionen. Die Zahl hinter den Bezeichnungen der Systeme entspricht der Dämmstoffstärke in cm. Bei allen 48 cm starken Dämmschichten verläuft der Wärmestrom parallel zur Faser, λ= 0,08 W/(mK) (HD-Ballen flach liegend), bei den 36 cm (HD-Ballen hochkant liegend oder stehend) und 70 cm (Q-Ballen hochkant liegend oder stehend) starken Dämmschichten verläuft der Wärmestrom senkrecht zur Faser, λ=0,052 W/(mK).

Die Wärmedurchgangskoeffizienten der Konstruktionen liegen um 0,15 W/(m²K) mit Ausnahme des Systems Gagné mit einem (über die Skala hinausgehenden) durch den hohen Zementanteil bedingten U-Wert von 0,7 W/(m²K) und des ballenbündigen fugenorientierten Skeletts (Fo bb 70), welches durch die

verwendeten 70 cm dicken Ballen einen U-Wert von nur 0,07 W/(m²K) aufweist.
Für Passivhäuser wird oft ein maximaler U-Wert von 0,15 W/(m²K) genannt. Dieser Wert ergibt sich aus der Wärmeenergie, die über die Lüftungsanlage des Passivhauses unter den Kriterien Behaglichkeit und Hygiene eingebracht werden kann. Dieses „Passivhauskriterium" wird durch keine der Konstruktionen, in denen flach liegende HD-Ballen verwendet werden, erfüllt. Aufgrund ihres hohen Holzanteils erfüllt auch die Rahmenkonstruktion dieses Kriterium nicht. Nach der AbZ für Baustrohballen ist eine additive Dämmschicht zum Schutz der Strohballen vor dem Außenklima vorgeschrieben. Durch diese zusätzliche Dämmschicht erfüllt die Rahmenwand nach der AbZ das Passivhauskriterium. Aufgrund des geringen Holzanteils in der Dämmebene schneiden das Außenskelett, das Doppelskelett und die Gewölbekonstruktion mit Wärmedurchlasskoeffizienten unter 0,14 W/(m²K) besonders gut ab. Durch die massive tragende Holzschale des Scheibentragwerks, welche auf der Innenseite der Konstruktion vor der eigentlichen Dämmebene angeordnet ist, liegt der Wärmedurchgangskoeffizient dieser Konstruktion noch niedriger.

4.3 Zum summierten Energiebedarf über 50 Jahre (E_{50}) der untersuchten Strohballenkonstruktionen

4.3.1 Methode

Der summierte Energiebedarf über 50 Jahre (E_{50}) ist die Summe des Primärenergieinhaltes (PEI) und des Jahrestransmissionswärmebedarfes (Q_T) unter Berücksichtigung einer Anlagenaufwandszahl (e_p) von 1,4 über einen Zeitraum von 50 Jahren bezogen auf einen Quadratmeter Wandfläche:

$$E_{50} = PEI + 50 \cdot Q_T \cdot e_p$$

Der E_{50}-Wert ermöglicht damit eine überschlägige Abschätzung der Energiebilanz einer bestimmten Konstruktion nach 50 Jahren und gibt Hinweise darauf, ob sich z.B. ein höherer Primärenergieeinsatz für mehr Wärmedämmung durch die Energieeinsparungen im Betrieb amortisiert.
Q_T wird in Anlehnung an die EnEV ermittelt:

$$Q_T = G_t \cdot U_i$$

Dabei ist:
G_t: Heizgradstunden (kKh/a)
U_i: Wärmedurchgangskoeffizient der jeweiligen Konstruktion (W/(m²K))

Die Heizgradstunden G_t stellen hier einen Proportionalitätsfaktor zwischen den Transmissionsverlusten über die Bilanzperiode und dem U-Wert dar. Streng genommen ist der damit unterstellte lineare Zusammenhang von U-Wert der Außenwand und Primärenergiebedarf des Gebäudes nicht gegeben: Der U-Wert der Außenbauteile wirkt nicht nur über QT auf den Heizwärmebedarf, unterschiedliche Bauteilaufbauten haben unterschiedliche Wärmebrückenverluste zur Folge, der Nutzungsgrad interner und solarer Gewinne hängt vom Wärmeschutzniveau ab, die Anlagenaufwandszahl wird ebenfalls durch den Wärmeschutz bestimmt.
Aus dieser Aufzählung wird die Schwierigkeit einer pauschalen Angabe der Heizgradstunden deutlich. Insbesondere dann, wenn nur eine Außenwand und nicht ein ganzes Gebäude betrachtet werden soll. Genaue Werte für den Jahrestransmissionswärmebedarf sind nur durch dynamische Simulationen für ein bestimmtes Gebäude zu generieren. Um den Berechnungsaufwand in einem angemessenen Rahmen zu halten, werden die Heizgradstunden hier pauschal angenommen. Anzumerken ist jedoch, dass die ermittelten Größen aufgrund der gewählten Methode nur orientierende Werte darstellen können.
Die Wärmeschutzverordnung 1995 verwendet Heizgradstunden in Höhe von 84 kKh/a, gleiches gilt für das PHPP des Passivhaus Institutes, in welchem jedoch eine Korrektur der Heizgradstunden über eine Wärmegewinn/ -verlustrechnung implementiert ist. Die EnEV verwendet 66 kKh/a. Dieser Wert trägt einerseits dem verbesserten Wärmedämmstandard gegenüber der WSV 1995 Rechnung ist aber andererseits politisch motiviert. Um eine Vergleichbarkeit mit den gültigen Verordnungen zu wahren, wurden für die Berechnung des Jahrestransmissionswärmebedarfes in dieser Arbeit die 66 kKh/a nach EnEV angesetzt. Da ein Verkürzung der Heizperiode und damit ein Absinken der Heizgradstunden mit kleiner werdendem Wärmedurchgangskoeffizienten zu erwarten ist, werden die Jahrestransmissionswärmebedarfe insbesondere der untersuchten Konstruktionen mit sehr niedrigem Wärmedurchgangskoeffizienten in der Realität geringer ausfallen, als berechnet.
Weitere Informationen können Anhang III.6, *Zur Berechnung des summierten Energiebedarfes E_{50} der untersuchten Strohballenkonstruktionen,* entnommen werden.
Zu beachten ist, dass der Sockel und weitere unmittelbar an Strohballenkonstruktionen angrenzende Bauteile als adiabat betrachtet werden.

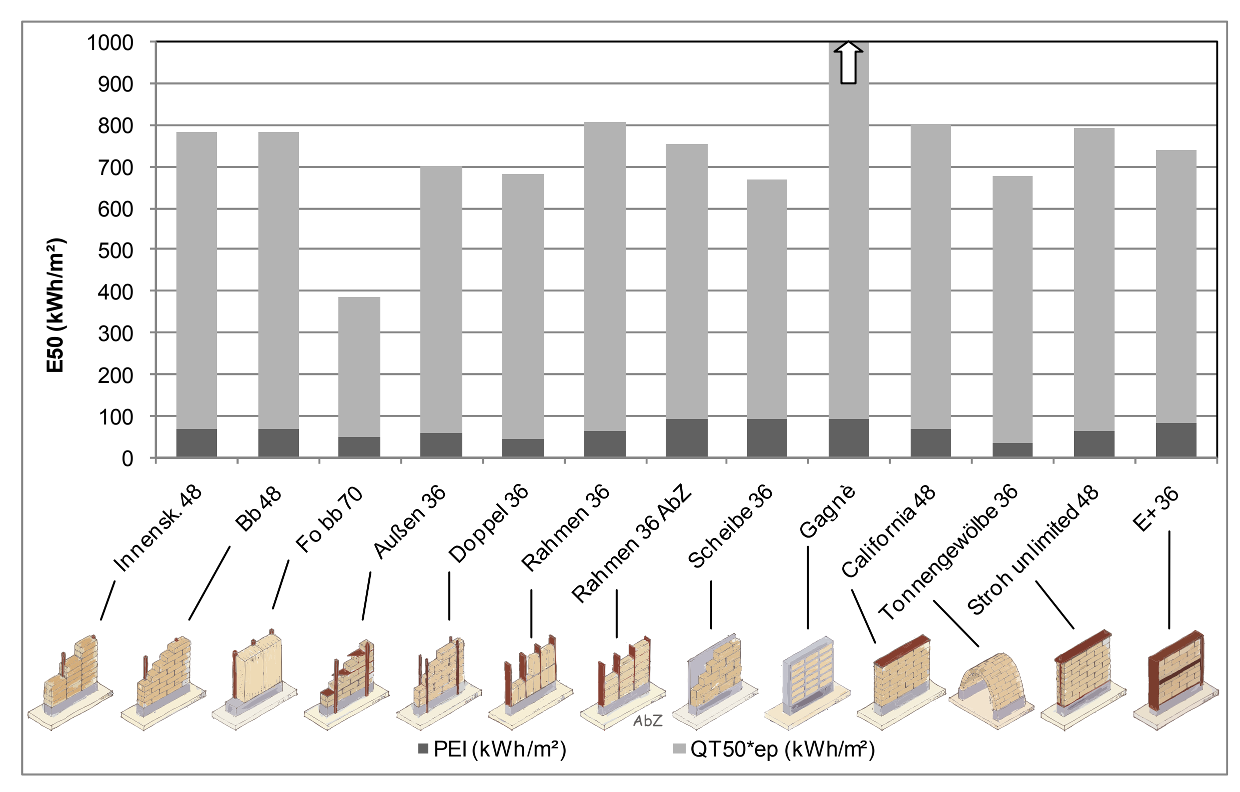


Abbildung 4.7: E_{50}-Werte der untersuchten Strohballenkonstruktionen

4.3.2 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse

Vergleich der untersuchten Konstruktionen hinsichtlich ihres E_{50}-Wertes

Aus Abbildung 4.7 ist ersichtlich, dass der Anteil des Transmissionswärmebedarfs gegenüber dem Anteil des PEI bei allen Konstruktionen deutlich überwiegt. Den geringsten Energiebedarf weist das System mit der stärksten Dämmschicht, das fugenorientierte ballenbündige Skelett (Fo bb 70) mit 337 kWh/m² auf. Den mit Abstand höchsten, weit über die Skala hinausgehenden Energiebedarf, weist das System Gagné mit über 3300 kWh/m² auf. Der Energiebedarf aller anderen Konstruktionen liegt etwa zwischen 650 und 800 kWh/m². Auch bei der Betrachtung des Energiebedarfes nach 50 Jahren fällt auf, dass die lasttragenden Konstruktionen nicht besser abschneiden als die nicht lasttragenden Konstruktionen.

Einfluss des Wärmedurchgangskoeffizienten auf den E_{50}-Wert von Strohballenkonstruktionen im Vergleich mit einer konventionellen Konstruktion

Abbildung 4.8 zeigt den Gesamtenergiebedarfes des fugenorientierten ballenbündigen Skeletts (Fo bb), des Systems E+ und eines Wärmedämmverbundsystems in Abhängigkeit vom U-Wert summiert über 50 Jahre.

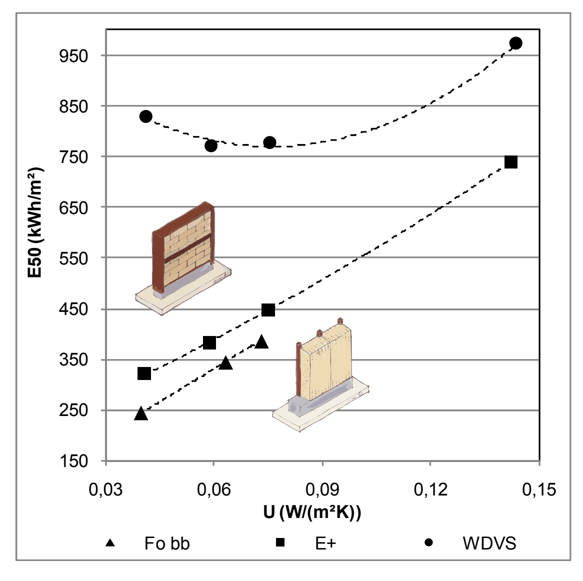


Abbildung 4.8 Einfluss des Wärmedurchgangskoeffizienten auf den E_{50}-Wert

Bei allen Konstruktionen sinkt mit sinkendem Wärmedurchgangskoeffizienten zunächst auch der E_{50}-Wert. Während sich diese Tendenz bei den Strohballenkonstruktionen über den gesamten betrachteten Bereich fortsetzt, kehrt sich der Trend beim Wärmedämmverbundsystem um. Ab einem bestimmten Optimum amortisiert sich der Mehrverbrauch an Primärenergie nicht mehr durch den Minderbedarf im Betrieb des Bauteils. Bei den Strohballenkonstruktionen ist dieser Effekt nicht zu beobachten. Selbst bei einem U-Wert von 0,04 W/(m²K), entsprechend einer Dämmstoffstärke

von 1,3 m Stroh bei Wärmestrom senkrecht zur Faser, amortisiert sich der geringe Mehraufwand durch den niedrigen Primärenergiebedarf des Dämmstoffes Stroh durch den Minderbedarf im Betrieb.

4.4 Arbeitsaufwand zur Herstellung von Strohballenkonstruktionen

4.4.1 Methode

Der Arbeitsaufwand zur Herstellung von Strohballenkonstruktionen wurde mit Hilfe einer Befragung mittels Fragebögen abgeschätzt. An der Befragung nahmen Scharmer (2007) und Fuchs/Imhoff (2007) und der Verfasser teil. Während die Angaben von Scharmer und dem Verfasser vergleichbar waren, bedurften die von Fuchs/Imhoff zur Verfügung gestellten Daten einer Interpretation, um eine Vergleichbarkeit herzustellen.

4.4.2 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse

Konstruktionsunabhängige Arbeiten

Der Arbeitsaufwand für die konstruktionsunabhängigen Arbeiten (Rasieren der Ballen, Ausstopfen von Fugen in der aufgeschichteten Wand und Verputzen der Wände) wurde von Scharmer und dem Verfasser differenziert nach der Ballenausrichtung abgeschätzt. Scharmer und der Verfasser kommen im Wesentlichen zu gleichen Ergebnissen, nur bei der Bewertung des Ausstopfens gibt es leichte Differenzen.

In Abbildung 4.9 ist der Arbeitsaufwand für das Rasieren, Ausstopfen und Verputzen in Abhängigkeit von der Ballenorientierung dargestellt. Deutlich erkennbar ist, dass das Verputzen mit Abstand am arbeitsintensivsten, das Rasieren am wenigsten arbeitsintensiv eingeschätzt wird. Das Rasieren flach liegender Ballen ist aufwändiger als das Rasieren hochkant liegender oder stehender Ballen. Das Ausstopfen von Konstruktionen aus stehenden Ballen benötigt den geringsten Arbeitsaufwand. Durch das Komprimieren der Ballen in der Wand schließen sich die Fugen bei stehenden Ballen besser als bei den anderen Orientierungen, woraus sich ein Minderaufwand ergibt. Bei flach liegenden Ballen können die zu stopfenden Löcher an den Ballenstößen durch die gesamte Wand reichen. Dies ist bei den hochkant liegenden Ballen zwar nicht der Fall, jedoch ist es hier aufwändiger, das lose Stroh, mit welchem die Fugen geschlossen werden, so ein zu stopfen, dass es beim Aufbringen der Putzschicht nicht wieder herausfällt. Das Verputzen flach liegender Ballen ist am wenigsten aufwändig, da der Putz aufgrund der Oberflächenstruktur des Ballens bei dieser Orientierung den meisten Halt findet. Bei hochkant liegenden Ballen stehen die Strohhalme in der Tendenz senkrecht. Hier kann der Putz leichter abrutschen, das Verputzen gestaltet sich schwieriger und daher arbeitsaufwändiger. Bei stehenden Ballen liegen die Halme in der Tendenz waagerecht, der Putz rutsch weniger leicht ab, verbindet sich aber nicht so gut mit dem Stroh wie bei den flach liegenden Ballen.

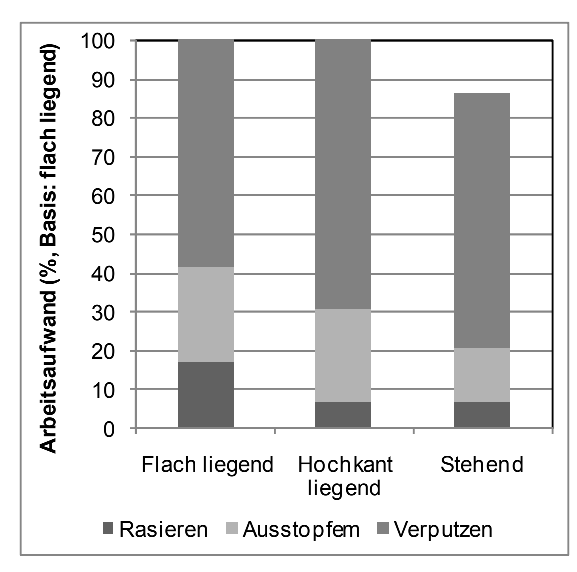


Abbildung 4.9: Arbeitsaufwand für konstruktionsunabhängige Arbeiten

Insgesamt ergibt sich hinsichtlich des Arbeitsaufwandes für das Rasieren, Ausstopfen und Verputzen ein leichter Vorteil für stehend orientierte Ballen (die mit den hochkant liegenden Ballen auch hinsichtlich der Wärmeleitfähigkeit zu bevorzugen sind), flach und hochkant liegende Ballen wurden insgesamt gleich bewertet.

Zusätzlich wurde bewertet, ob der Arbeitsaufwand für das Verputzen der Strohballenkonstruktionen geringer ist als der des Verschalens. Übereinstimmend wird ein Verputzen als deutlich aufwändiger bewertet als das Verschalen.

Konstruktionsabhängige Arbeiten

Der Arbeitsaufwand für das Erstellen unterschiedlicher Strohballenkonstruktionen wurde von Scharmer, dem Verfasser und in einigen Fällen von Fuchs/Imhoff abgeschätzt.

In allen Fällen (ausgenommen Scheibentragwerke) zeigte sich, dass eine Schalung als Außenbekleidung weniger Arbeitsaufwand verursacht als ein Putz. Wurden unterschiedliche Ballenorientierungen betrachtet, schnitten hochkant liegende bzw. stehende Ballen besser ab, als flach liegende.

Abbildung 4.10 zeigt die über alle Konstruktionen gemittelte, prozentuale Verteilung des Arbeitsaufwandes auf die einzelnen Tätigkeitsgruppen. Den größten Einzelaufwand stellt der Innenputz dar, gefolgt von den Holzarbeiten. In dieser Kategorie sind zudem die Schwankungen zwischen den einzelnen Konstruktionen am größten (zwischen 8% für die Gewölbekonstruktion -hier geht der Bau der Schalung mit ein- und 26% für die Rahmenkonstruktion). Die eigentlichen Stroharbeiten kommen zusammen auf ca. ein Drittel des Gesamtaufwandes.

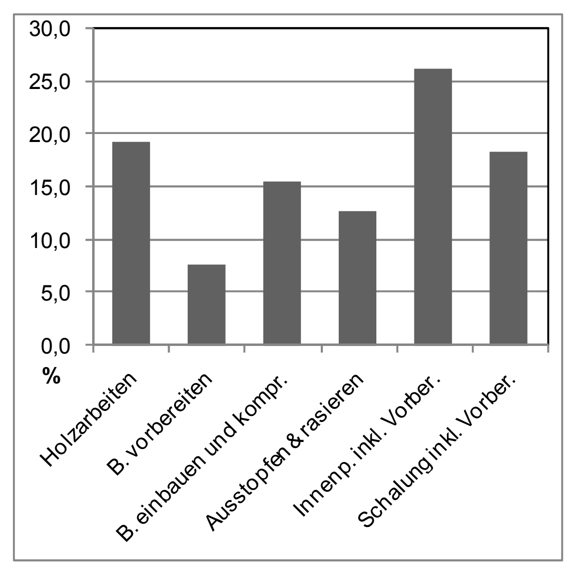


Abbildung 4.10: Durchschnittliche prozentuale Verteilung des Arbeitsaufwandes

Der ermittelte Arbeitsaufwand wird in Abbildung 4.11 für ausgewählte Konstruktionen (Putz innen, Schalung außen) visualisiert. Mit dem geringsten Arbeitsaufwand zur Herstellung kommt das Scheibentragwerk aus. Hier kann die (vorgefertigte) Holzkonstruktion sehr schnell aufgestellt werden und es entfällt vor allem der Innenputz. An zweiter Stelle steht das fugenorientierte ballenbündige Skelett, dessen Holzkonstruktion schnell erstellt werden kann. Außerdem wird durch die Verwendung von Großballen weniger Zeit zum Vorbereiten der Ballen und zum Ausstopfen von Fugen benötigt. Bei der mit stehenden Ballen verfüllten Rahmenkonstruktion gestalten sich der Strohballeneinbau und das Komprimieren unkompliziert. Die lasttragenden Konstruktionen inklusive des Gewölbes schneiden auch hier entgegen der ursprünglichen Annahmen unerwartet schlecht ab. Der höchste Arbeitsaufwand wurde für das ballenbündige Skelett veranschlagt. Hier kumulieren sich ein relativ hoher Aufwand für das Verputzen (Putzträger über den Stützen und der Pfette), für die Vorbereitung (Ausklinken) und das Stopfen (flach liegende Ballen) der Ballen sowie der zusätzliche Aufwand für das Erstellen und Befestigen der Unterkonstruktion für die Schalung.

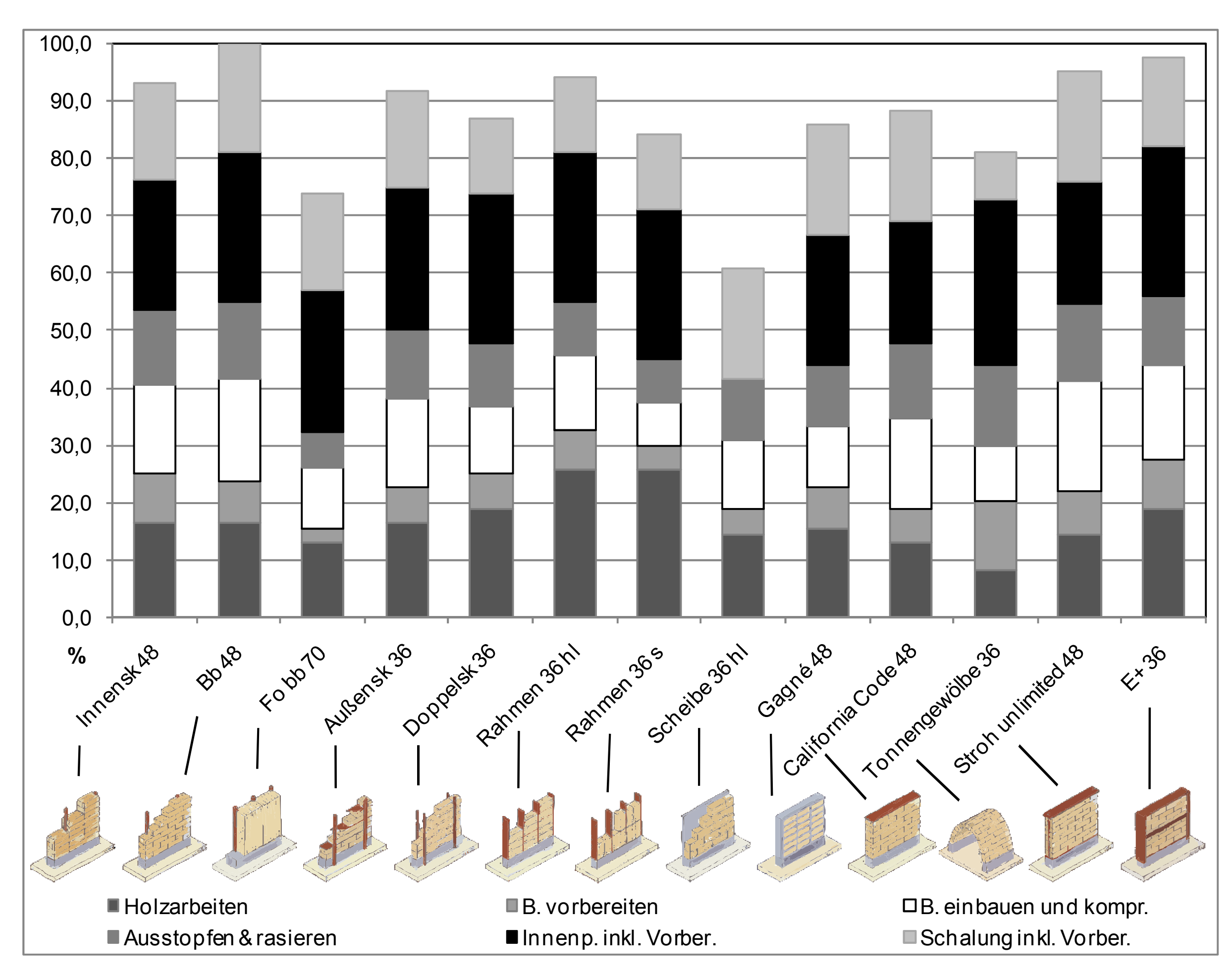


Abbildung 4.11: Vergleich des Arbeitsaufwandes zur Erstellung unterschiedlicher Strohballenkonstruktionen

4.5 *Tabellarische Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse*

Tabelle 4.1 listet die beschriebenen Eigenschaften der untersuchten Konstruktionen auf.

Tabelle 4.1: Eigenschaften der untersuchten Strohballenkonstruktionen

		Innensk. 48	Bb Skelett 48	Fo bb Skelett 70	Au-ßensk. 36	Doppelsk. 36	Rahmen 36 S	Scheibe 36 hl	Gagné 48	California 48	Tonnen-ge-wölbe 36	Stroh unlimited 48	E+ 36
Orien-tierung	FL	+	+	+	+	+	/	0	+	+	/	+	0
	HL	/	/	/	+	+	/	+	+	-	+	-	+
	S	-	-	+	-	-	+	+	-	/	/	/	/
Beklei-dung	Putz	+	+	+	+	-	0	+	+	+	+	+	0
	Schalung	-	-	0	+	+	+	-	0	-	0	-	+
Aussstei-fung	Platte/ Dia-gonalsch.	/	-	+	-	+	++	System-inhärent	System-inhärent	/	/	/	+
	Strebe	-	-	/	+	+	/			/	/	/	/
	Windr. band	/	-	+	+	+	+			0	/	/	+
Herstellungsauf-wand		-	--	++	-	0	+	++	0	0	+	-	--
PEI (kWh/m²) U (W/(m²K)) E50 (kWh/m²)		70 0,16	70 0,16	49 0,07	60 0,14	47 0,14	63 0,16	95 0,70	94 0,16	72 0,14	35 0,14	64 0,16	82 0,14

5 Statische Möglichkeiten und Grenzen von lasttragenden Strohballenkonstruktionen

In Teil II, *Elastomechanisches Verhalten von Strohballen- und Strohballenwänden*, wurde vorgeschlagen, lasttragende Strohballenwände mit einer Spannung von nicht mehr als 20 kN/m² zu belasten. Dieser Wert wird auch in den amerikanischen Straw-Bale-Buildingcodes als Obergrenze angegeben.
In diesem Kapitel soll untersucht werden, welche Einsatzmöglichkeiten sich unter dieser Bedingung für lasttragende Strohballenkonstruktionen ergeben.
Dazu wurden die maximalen Dach- bzw. Deckenspannweiten von ein- und zweigeschossigen Gebäuden bei unterschiedlichen Wandstärken und Dachdeckungen ermittelt.

5.1 Methode

Die Flächenlast mit unterschiedlichen Materialien gedeckter Dächer wurde berechnet und mit Verkehrslasten beaufschlagt (siehe Abschnitt 0 und Tabelle 5.1). Für zweigeschossige Gebäude wurde zusätzlich die Flächenlast einer Deckenkonstruktion aus Holzbalken inklusive Verkehrslast und die Eigenlast der OG-Wand bestimmt (siehe Abschnitt 5.1.2). Die Linienlasten bei einer Spannung von 20 kN/m² wurden für unterschiedliche Wanddicken ermittelt (siehe Abschnitt 5.1.3). Auf der Basis dieser Werte wurde die maximale Dach-bzw. Deckenspannweite für die betrachteten Dachdeckungen in Kombination mit den unterschiedlichen Wanddicken bestimmt.

Tabelle 5.1: Betrachtete Dachaufbauten und ihre Eigenschaften

	Gründach		**Betondachsteine**		**Faserzementwellplatten**	
Dachaufbau	- Vegetationsschicht - Leichtsubstrat 150 mm - Dachabdichtung - Strohballen/ Sparren 6/36 - PE-Folie - OSB-Platte 20 mm		- Betondachsteine - Lattung 3/5 - Unterspannbahn - Lattung 3/5 - Lehmputz 15 mm - Strohballen/ Sparren 6/36 - OSB-Platte 20 mm		- Faserzement-wellplatte - Unterspannbahn - Lattung 3/5 - Lehmputz 15 mm - Strohballen/ Sparren 6/36 - OSB-Platte 20 mm	
Sparren-abstand	53 cm	100 cm	53 cm	100 cm	53 cm	100 cm
Flächenlast [1] (kN/m²)	3,66	3,50	2,54	2,38	2,2	2,04
Spannweite [1] (m)	7,50	6,15	8,60	7,00	9,00	7,35
PEI [2] (kWh/m²)	75,7	64,6	95,6	83,6	122,2	110,2
U-Wert [3] (W/(m²K))	0,14	0,13	0,16	0,15	0,16	0,15

[1] : Siehe Anhang III.7, inkl. Verkehrslast; [2]: Siehe Anhang III.4; [3]: Siehe Anhang III.5

5.1.1 Dächer

Ausgewählt wurden die Dachdeckungen Gründach, Betondachsteine und Wellfaserzementplatten. Alle Dächer haben eine Neigung von 20°. Die Schneelast von 1kN/m³ entspricht dem Wert für Schneelastzone III, 400 m über NN. Die Dachaufbauten sind im Wesentlichen

gleich. Raumseitig werden die Konstruktionen durch eine OSB-Platte abgeschlossen, die als Dampfbremse und zur Aussteifung dient. Beim Gründach wird zusätzlich eine PE-Folie als Dampfsperre eingelegt. Die tragende Funktion übernehmen 36 cm hohe und 6 cm breite Sparren im Abstand von 53 bzw. 100 cm. Die Dämmung besteht aus Strohballen, die einzeln (bei 53 cm Sparrenabstand) oder paarweise (bei 100 cm Sparrenabstand) zwischen die Spannen eingelegt werden. Es folgen Dachlatten, welche mit den OSB-Platten an der Unterseite der Konstruktion eine Torsionsverformung verhindern. Beim Gründach folgt direkt die Dachabdichtung, eine 15 cm Substratschicht und der Bewuchs. Für die Substratschicht des Gründaches wurde eine Flächenlast von 0,12 kN/m² pro cm Schichtdicke angenommen. Bei den anderen beiden Deckungen wird auf die Dämmung zum Brandschutz zunächst eine Lehmputzlage aufgebracht, dann folgt eine Unterspannbahn und die Dacheindeckung. Tabelle 5.1 gibt Auskunft über die genauen Dachaufbauten, Flächenlasten, maximale Spannweiten, Wärmedurchgangskoeffizienten und PEI.
Detailliertere Angaben können Anhang III.7, *Zu den statischen Möglichkeiten und Grenzen lasttragender Strohballenkonstruktionen*, entnommen werden.

5.1.2 Zwischendecke

Es wurde eine Holzbalken-Zwischendecke mit einer Flächenlast von 2,54 kN/m² inkl. Verkehrslast gewählt. Aufbau:

- Bodenbelag: Hobeldielen (22 mm),
- Trittschalldämmung: Holzweichfaserplatte (50 mm),
- Schüttung: Sand (30 mm),
- Rieselschutzpapier,
- Sichtschalung: N+F (22 mm),
- Deckenbalken 14/22,

Die maximale Spannweite dieser Decke beträgt 5,0 m. Detailliertere Angaben können Anhang III.7 entnommen werden.

5.1.3 Wandaufbauten

Gewählt wurden beidseitig 4 cm dick verputzte Wände. Die Wanddicke wurde zwischen 0,36 m und 1,3 m in insgesamt sechs nicht äquidistanten Breiten, die sich aus den Strohballenmaßen ergeben, variiert. Tabelle 5.2 zeigt die Eigenlasten und maximalen Linienlasten bei einer Spannung von 20 kN/m². In allen Fällen wird davon ausgegangen, dass 1/3 der Wandlänge geöffnet ist. Detailliertere Angaben können III.7 entnommen werden.

Tabelle 5.2: Eigen- und maximale Linienlasten der gewählten Wandstärken

Wanddicke (Stroh) (cm)	**Eigenlast (kN/m)**	**Maximale Linienlast (kN/m)** [1]
0,36	3,12	4,80
0,48	3,36	6,40
0,7	3,80	9,33
0,9	4,20	12,00
1,2	4,80	16,00
1,3	5,00	17,33

[1] : aufgebracht auf die Wandoberseite bei 1/3 Fensteröffnung

5.2 *Darstellung und Diskussion der Ergebnisse*

Die Ergebnisse der Berechnungen der möglichen Spannweiten von Dächern und Decken auf lasttragenden Strohballenkonstruktionen sind in Tabelle 5.3 dargestellt. Abbildung 5.1 visualisiert mögliche Spannweiten von zweiseitig aufgelegten Dächern und Decken auf lasttragenden Strohballenkonstruktionen. Nähere Angaben können Anhang III.7 entnommen werden.

Tabelle 5.3: Mögliche Spannweiten von Dächern und Decken auf lasttragenden Strohballenkonstruktionen

Wandbreite (Stroh) (m)	**Max. Spannweiten eingeschossig (m)**			**Max. Spannweiten zweigeschossig (m)**		
	Gründach	Betondachsteine	Faserzementwellplatten	Gründach	Betondachsteine	Faserzementwellplatten
0,36	2,62	3,88	4,54	0,54	0,67	0,72
0,48	3,49	5,18	6,05	1,06	1,31	1,41
0,7	5,09	7,00	8,18	2,00	2,48	2,67
0,9	6,26	8,60*	9,00*	*2,78*	3,54	3,82
1,2	7,50*	8,60*	9,00*	***3,93***	*5,14*	*5,43*
1,3	7,50*	8,60*	9,00*	***4,36***	***5,40***	***6,00***

kursiv: OG-Wand aus 0,48 m Stroh, ***kursiv+fett: OG-Wand aus 0,70 m Stroh***
Sparrenabstand: 1 m | Sparrenabstand: 0,53 m | ** Spannweitenbegrenzung durch Sparren*

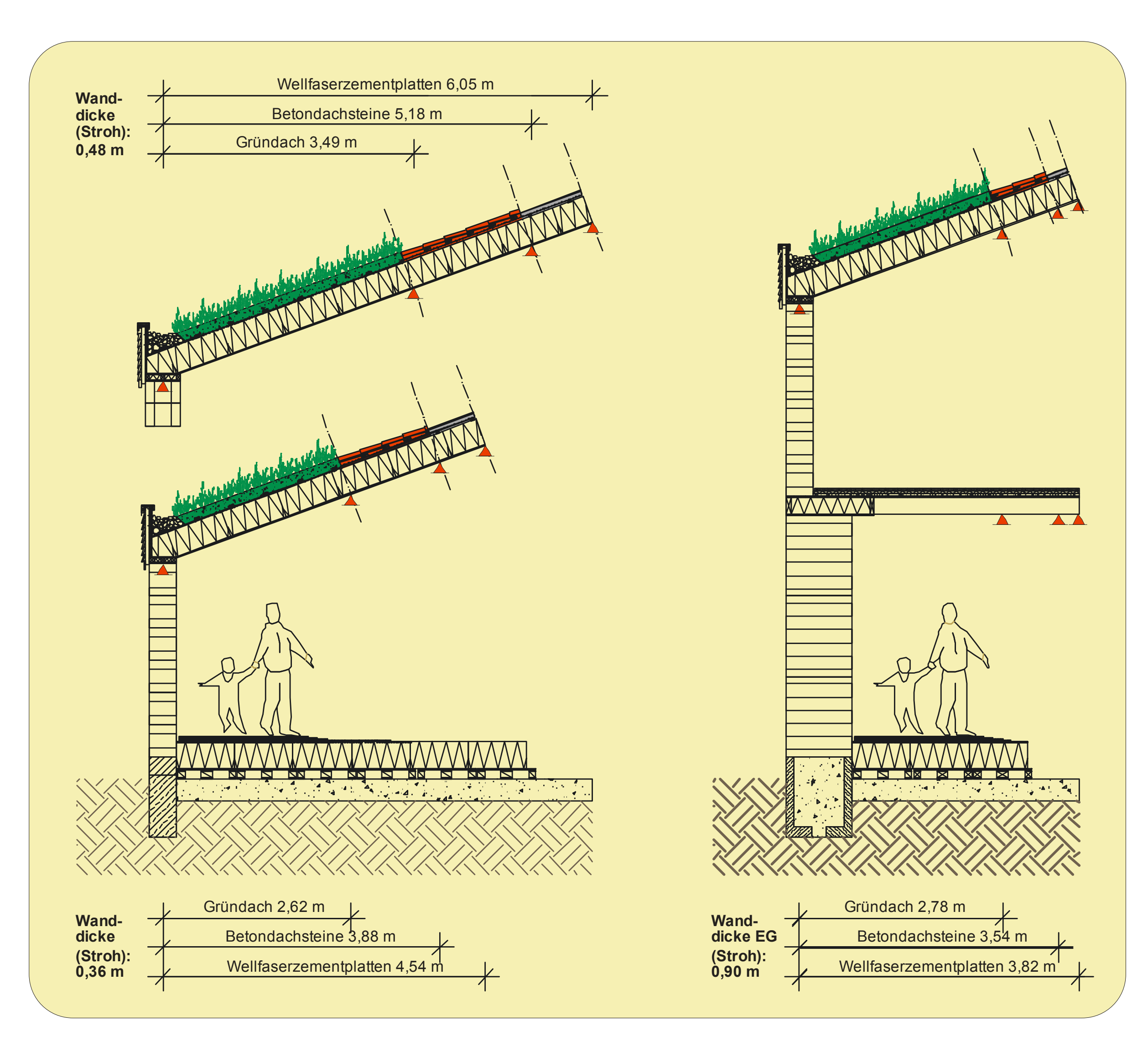


Abbildung 5.1: Mögliche Spannweiten von zweiseitig aufgelegten Dächern und Decken auf lasttragenden Strohballenkonstruktionen unter den in Abschnitt 5.1 erläuterten Annahmen

Aus Tabelle 5.3 kann entnommen werden, dass für lasttragende eingeschossige Strohballengebäude schon bei der Verwendung hochkant liegender HD-Ballen (Strohanteil der Wanddicke 36 cm) und einer leichten Dachkonstruktion aus Faserzementwellplatten praxisrelevante Spannweiten möglich sind. Wird eine Dachkonstruktion gewählt, bei der alle vier Wände zum Tragen der Dachkonstruktion herangezogen werden (z.B. Pyramidendach), kann die Spannweite nochmals deutlich erhöht werden. Der Einsatz weiterer tragender Elemente (Hybridkonstruktion), z.B. einer tragenden Mittelwand oder von Stützen, vergrößert die Spannweite und damit den Anwendungsbereich deutlich, vgl. Abbildung 5.2.2.

In der Regel ist es wünschenswert, auf der Südseite des Gebäudes größere Fensterflächen anzuordnen als auf der Nordseite. Diesem Wunsch steht zunächst die Maxime der gleichmäßigen vierseitigen Belastung entgegen. Eine Möglichkeit, die Südseite bei gleich bleibender Belastung stärker zu öffnen, ist eine Verringerung der Flächenlast des Süddaches. Im Norden, Osten und Westen könnten schwere Gründächer, im Süden z.B. ein leichtes Fotovoltaikdach angeordnet werden.

Gründächer können ab einer Wandstärke von 70 cm sinnvoll eingesetzt werden.
Bei größeren Wandstärken ist das gewählte Tragsystem des Daches (ballenhohe Sparren) der begrenzende Faktor. Werden hier andere Tragsysteme, wie z.B. unterspannte Träger, Fachwerkträger oder Raumtragwerke eingesetzt, können bei zweiseitiger gleichmäßiger Belastung und einer Wandbreite von 1,3 m durchaus Spannweiten von über 15 m realisiert werden, was Möglichkeiten z.B. im Sporthallen- oder Industriebau eröffnet. Bei vierseitiger gleichmäßiger Belastung aller Wände und quadratischem Grundriss sind bei nur 70 cm Wandstärke ebenfalls Spannweiten von über 15 m denkbar, bei 1,3 m Wandstärke ließen sich bei Verwendung geeigneter Dachtragwerke theoretisch mehr als 25 m überspannen.

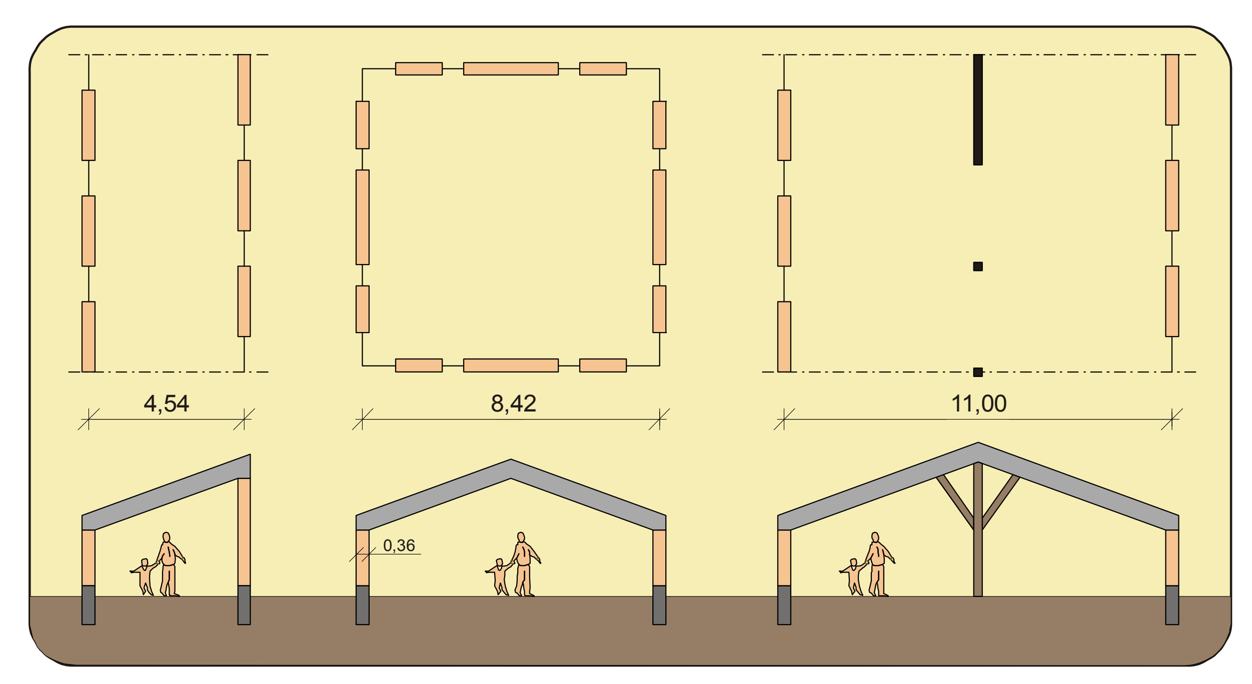


Abbildung 5.2: Möglichkeiten zur Erhöhung der Spannweite eingeschossiger lasttragender Strohballenwände bei Verwendung von hochkant liegenden HD-Kleinballen (36 cm Wanddicke)

Kommen solche Tragsysteme zum Einsatz, wird die Dachlast in der Regel z.B. in Fachwerkträgern konzentriert und dann in die Wandkonstruktion eingeleitet. Bei Strohballenwänden müsste diese Last zunächst über biegesteife Ringbalken in die Strohballenwand eingeleitet werden. Ob sich ein solcher Ringbalken lohnt oder ob es nicht effizienter ist, die Lasten aus weit spannenden Dachtragwerken über Stützen abzuleiten, ist, den Ergebnissen aus Kapitel 4 dieses Teils dieser Arbeit folgend, allerdings fraglich. Eine viel versprechende Möglichkeit, weitgespannte Dachtragwerke zu realisieren, die ausschließlich aus Strohballen bestehen, könnten in Zukunft lasttragende Gewölbekonstruktionen sein.

Zweigeschossige Gebäude scheinen bei leichten Dachkonstruktionen ab einer Strohdicke der EG-Wand von 90 cm voll. Abbildung 5.3 stellt die möglichen Spannweiten dar.

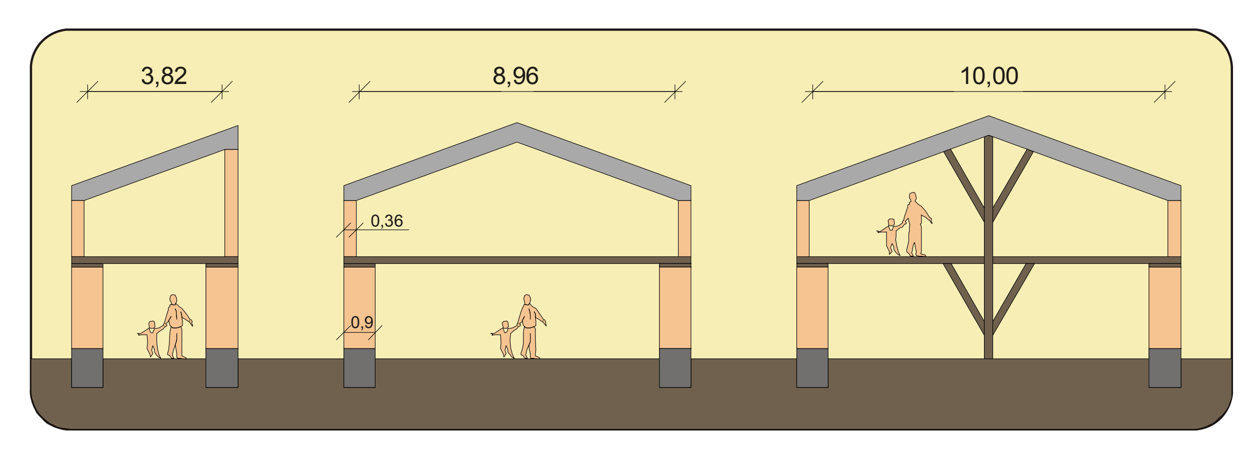


Abbildung 5.3: Maximale Spannweiten zweigeschossiger Strohballengebäude mit unterschiedlicher Lastverteilung: Zweiseitig belastet; vierseitig belastet; mit additiver Tragkonstruktion (Grundrisse analog zu Abbildung 5.2).

Auch bei zweigeschossigen Gebäuden sind bei vierseitiger gleichmäßiger Belastung Spannweiten von knapp 9 m möglich, wenn eine leichte Dachkonstruktion und 90 cm breite Strohballen im Erdgeschoss verwendet werden. Eine über 9 m spannende Zwischendecke, die ihre Last auf alle vier Seiten gleichmäßig verteilt, scheint in Konstruktion und Materialeinsatz aufwändig zu sein, kann aber z.B. mit Kassettendecken dennoch realisiert werden. Sinnvoller erscheint der Einsatz weiterer Tragelemente wie Stützen und oder Zwischenwände. Bei entsprechender Anordnung können unter den oben genannten Bedingungen durchaus Spannweiten von 5 m erreicht werden, die für den Wohnungsbau völlig ausreichend sind und sich z.B. mit Holzbalkendecken effizient überspannen lassen.

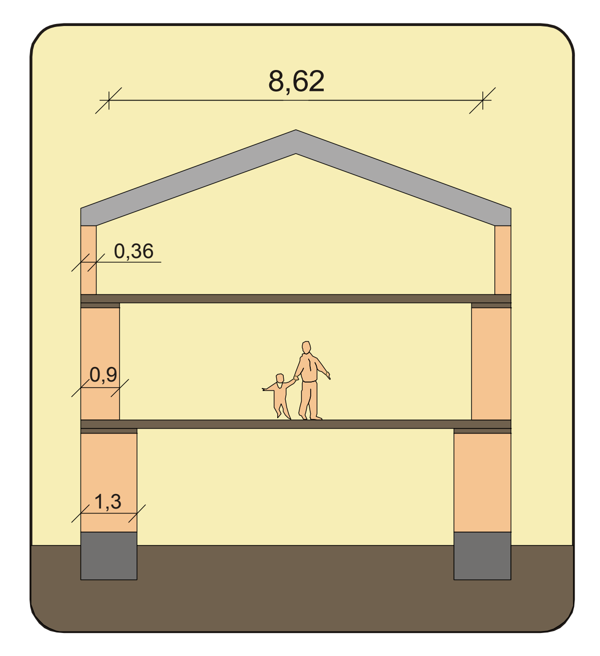


Abbildung 5.4: Dreigeschossiges lasttragendes Strohballengebäude bei gleichmäßiger vierseitiger Belastung (Grundriss analog zu Abbildung 5.2)

2006 führte Krone die Großballenpresse 12130 ein. Diese stellt Strohballen mit den Abmessungen 130x120x100-270 cm her. Mit der sich aus diesen Ballenabmessungen ergebenden Wandstärke von bis zu 130 cm können theoretisch auch dreigeschossige lasttragende Gebäude errichtet werden. In den Erdgeschosswänden würde mit einer Wandstärke von 130 cm, im 1. OG mit einer Wandstärke von 90 cm und im 2. OG mit einer Wandstärke von 36 cm gearbeitet werden. Bei einem leichten Dach und einer vierseitigen gleichmäßigen Belastung wäre eine Spannweite von über 8 m möglich, wie Abbildung 5.4 zeigt (Berechnungen siehe Anhang III.7).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass mit lasttragenden Strohballenkonstruktionen bei einer maximalen Spannung von 20 kN/m² in der Wand und einem Öffnungsanteil von einem Drittel unter Verwendung einer leichten Dachkonstruktion ein-, zwei- und dreigeschossige Gebäude erstellt werden können. Gründächer schränken die Spannweite der Konstruktionen ein, sind aber möglich. Der Einfluss der Dachlast nimmt mit der Geschosszahl ab.





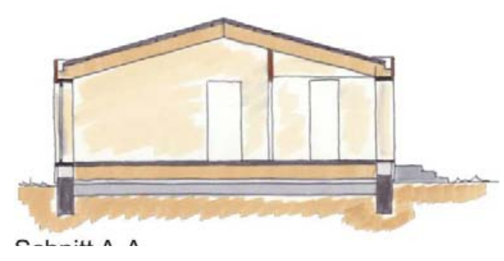


Abbildung 6.1: Skizzen zu dem beschriebenen lasttragenden, eingeschossigen Gebäude

6 Gestaltungsbeispiele

6.1 Lasttragendes Gebäude, eingeschossig

Baubeschreibung

Das lasttragende, eingeschossige Gebäude aus hochkant liegenden HD-Ballen (Wanddicke 36 cm) ist ein kleines Haus für Singles oder Paare als ständige Behausung oder als Wochenend- bzw. Ferienhaus mit Außenabmessungen von 8,9 m x 8,9 m. Das Raumprogramm umfasst einen Eingangsbereich (5,03 m²), einen zur Küche (8,94 m²) hin offenen Wohnbereich (27,16 m²), ein Schlafzimmer (13.93 m²) und ein Bad (4,7 m²). Die lasttragenden Strohballenwände sind im System E+ errichtet und innen mit Lehmputz, außen mit einer Stülpschalung verkleidet. Der Fußboden ist mit Strohballen (36 cm) auf Paletten gedämmt und mit einem Anhydritestrich versehen. Das Dach besteht aus 36 cm hohen, im Abstand von 53 cm verlegten Sparren, die mit Strohballen gedämmt sind, und ist mit Wellfaserzementplatten gedeckt. Die Innenwände sind in Trockenbauweise errichtet. Das Gebäude verfehlt die Anforderungen an ein Passivhaus deutlich. Tabelle 6.1 können weitere Daten zu dem entworfenen Gebäude entnommen werden, Abbildung 6.1 zeigt Ansicht, Schnitt und Grundriss des Gebäudes.

Tabelle 6.1: Daten zum beschriebenen lasttragenden, eingeschossigen Gebäude

EBF[1] (m²)	Überbaute Fläche (m²)	Bruttovolumen V_e (m³)	First-höhe (m)	Traufhö-he (m)	Bewoh-ner	Q_H[2] (kWh/(m²a))
59,76	79,21	263	4,3	3,28	2	40,2

[1]: Energiebezugsfläche nach PHPP; [2]: Jahresheizwärmebedarf nach dem Monatsverfahren des PHPP 2007. Abgesehen von Einbauwärmebrücken der Fenster wurden keine Wärmebrücken berücksichtigt. Aufgrund der hohen Wandstärken ist zu erwarten, dass sich durch die geometrischen Wärmebrücken ein insgesamt negativer Wärmebrücken-Verlustkoeffizient ergibt. Details zu den Berechnungen siehe Anhang III.8

6.2 Hybridgebäude, zweigeschossig

Baubeschreibung

Das zweigeschossige Gebäude mit Außenabmessungen von 15,7 m x 15,7 m in Hybridbauweise ist ein großzügiges Wohnhaus für eine große Familie, das zusätzlich Platz für einen Büroraum bietet. Abbildung 6.2 und Abbildung 6.3 zeigen Grundrisse, Schnitte und Ansichten des Gebäudes. Tabelle 6.2 können relevante Daten entnommen werden. Das Raumprogramm umfasst im EG einen Eingangsbereich (14,95 m²), dem unter der Treppe ein WC (1 m²) zugeordnet ist. Von diesem Eingangsbereich aus sind das Büro (22,78 m²), die Küche (16,62 m²) und der Essbereich (28,97 m²) erreichbar. Dieser Essbereich ist teilweise zweigeschossig und wird über ein Oberlicht im Dach belichtet. Er fungiert als weiterer Verteiler, von dem aus ein zweites WC (3,45 m²), welches auch Waschmaschine und Trockner beherbergt, ein Hauswirtschaftsraum mit Aufenthaltsqualität (10,45 m²), der große Wohnbereich (57,41 m²) und die Bibliothek (14,56 m²) erreichbar ist. Im OG befindet sich ein Gästezimmer (20.91 m²). Über die Galerie oberhalb des Essbereiches sind das Elternschlafzimmer (20,47 m²) mit direkt zugeordnetem Bad (4,22 m²), ein weiteres Bad (6,89 m²) und 4 Kinderzimmer (zwischen 20,65 und 22,72 m²) und ein Abstellraum (4,22 m²) erreichbar.

Die lasttragenden Strohballenwände sind im System E+ aus 130 cm dicken Strohballen im EG und 70 cm dicken Strohballen im OG errichtet. Innen sind alle Außenwände mit Lehmputz versehen, außen im EG mit Faserzementplatten beplankt und im OG mit einer Stülpschalung verkleidet. Die Wände der Nischen bestehen aus beidseitig verputzten 36 cm dicken Strohballen. Rund um den Essbereich ist eine Reihe tragender Holzstützen angeordnet.

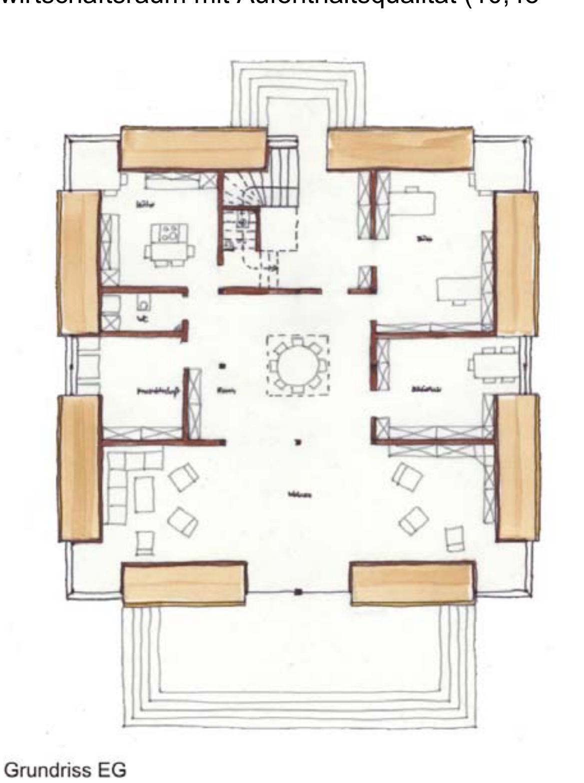






Abbildung 6.2: Skizzen zu dem zweigeschossigen Hybridgebäude (1)

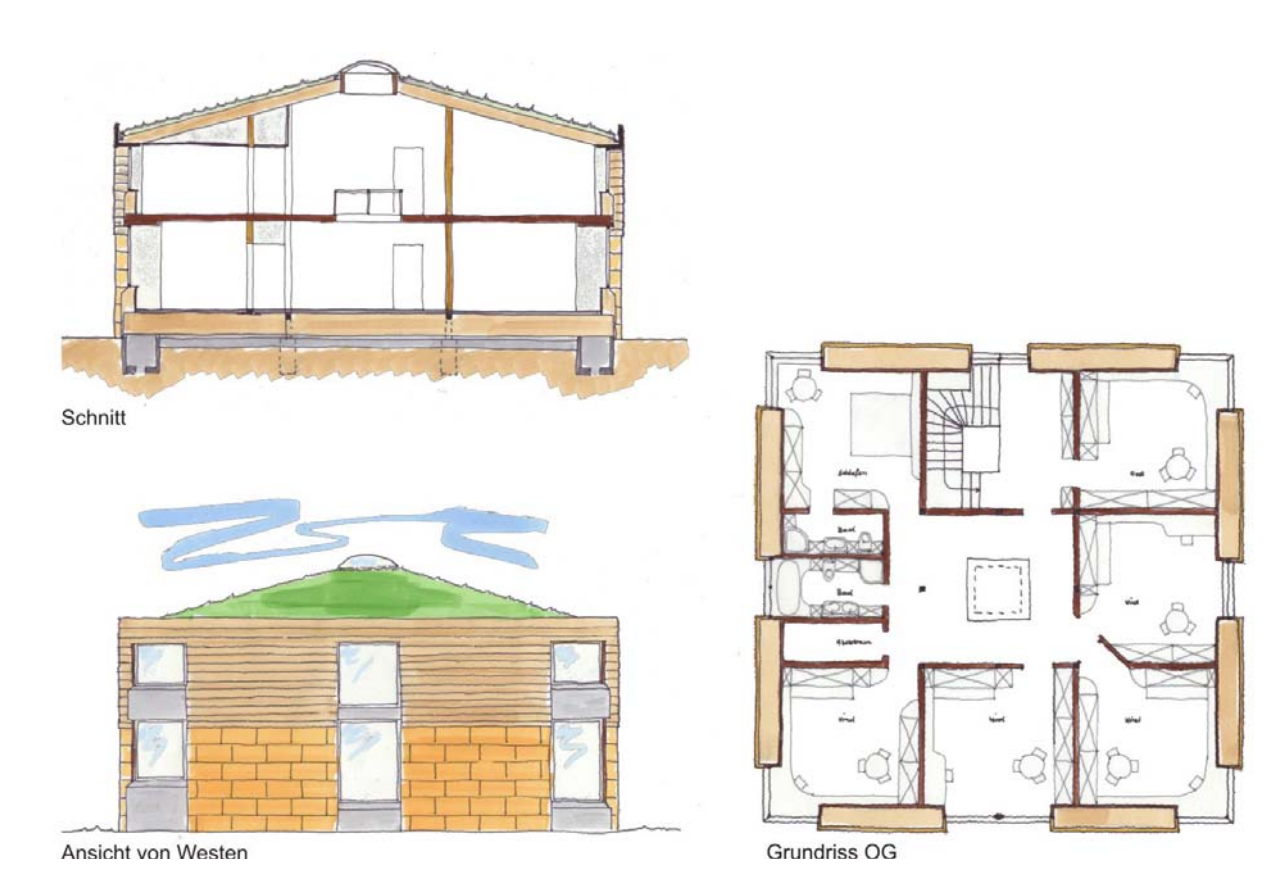


Abbildung 6.3: Skizzen zu dem zweigeschossigen Hybridgebäude (2)

Der Fußboden ist mit Strohballen (70 cm) auf Paletten gedämmt und mit einem Anhydritestrich versehen. Das begrünte Dach besteht aus 36 cm hohen, im Abstand von 53 cm verlegten Sparren, die mit Strohballen gedämmt sind.

Die Innenwände, 17,5 cm dick, bestehen aus Grünlingen als Sichtmauerwerk, die die Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes erhöhen. Für dieses Gebäude wird der Passivhausstandart nach PHPP 2007 erreicht.

Tabelle 6.2: Daten des entworfenen zweigeschossigen Gebäudes in Hybridbauweise

EBF[1] (m²)	Überbaute Fläche (m²)	Bruttovolumen V_e (m³)	First-höhe (m)	Traufhö-he (m)	Bewoh-ner	Q_H[2] (kWh/(m²a))
345,28	232,00	1771	8,71	6,68	6	14,6

[1]: Energiebezugsfläche nach PHPP; [2]: Jahresheizwärmebedarf nach dem Monatsverfahren des PHPP 2007. Abgesehen von Einbauwärmebrücken der Fenster wurden keine Wärmebrücken berücksichtigt. Aufgrund der hohen Wandstärken ist zu erwarten, dass sich durch die geometrischen Wärmebrücken ein insgesamt negativer Wärmebrücken-Verlustkoeffizient ergibt. Details zu den Berechnungen siehe Anhang III.8

6.3 Nicht lasttragendes Gebäude, zweigeschossig

Baubeschreibung

Das zweigeschossige, nicht lasttragende Gebäude ist ein großzügiges Doppelhaus mit je einer Doppelgarage und großen Kellerersatzflächen für je zwei Familien mit 3 Kindern (Außenmaxe über alles: 43,8 m x 10 m). Abbildung 6.4 und Abbildung 6.5 visualisieren den Entwurf. Tabelle 6.3 können relevante Daten entnommen werden.

Das Raumprogramm umfasst im EG einen Eingangsbereich (12,41 m²), dem unter der Treppe ein WC (1 m²) zugeordnet ist. Von diesem Eingangsbereich aus ist der Arbeitsraum (12,15 m²), die zum Essplatz hin offene Küche (12,7 m²) und der Wohnbereich (39,85 m²) erreichbar. Die Bibliothek (16,43 m²) ist über den Wohnraum erschlossen. Im OG werden die 3 Kinderzimmer (zwischen 13,69 und 17,1 m²), das Elternschlafzimmer (14,06 m²) und das Bad (11,7 m²) über eine zur Treppe hin offenen Galerie mit Aufenthaltsqualität betreten.

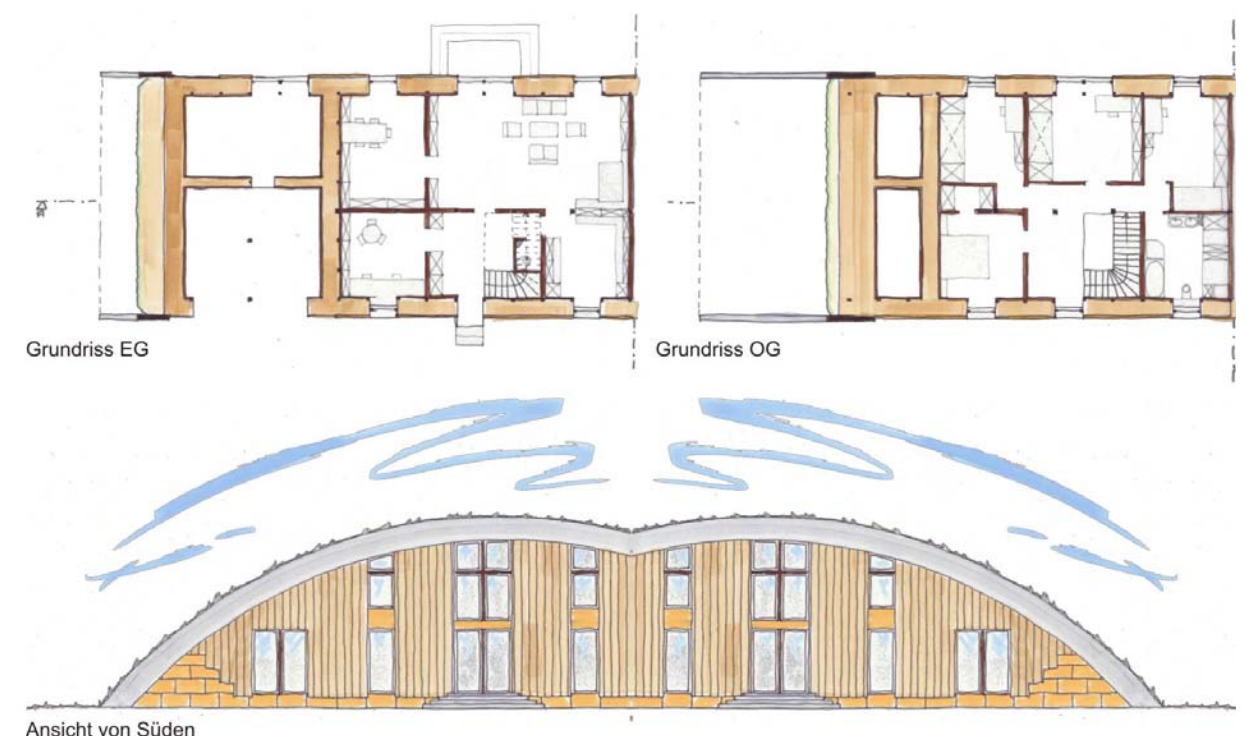


Abbildung 6.4: Skizzen zu dem zweigeschossigen, nicht lasttragenden Gebäude (1)

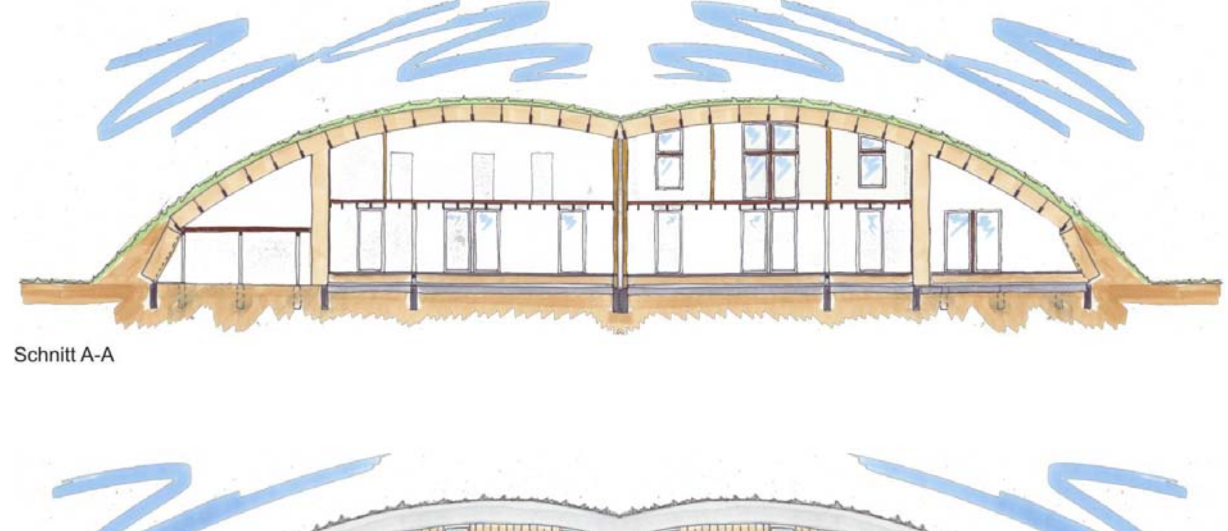
Im Bad sind in einem begehbaren Schrank Stauraum, Waschmaschine und Trockner angeordnet. Seitlich des Wohnteils befindet sich unter dem gemeinsamen geschwungenen Dach eine Doppelgarage, über der Lagerflächen angeordnet sind. Der verbleibende Raum zwischen Garage und Südwand kann als Lagerraum genutzt und später zu einem Atelier oder einer Einliegerwohnung ausgebaut werden.

Die nicht lasttragenden Strohballenwände sind als fugenorientiertes ballenbündiges Skelett mit einer Dämmstärke von 70 cm über beide Geschosse ausgeführt. Innen sind alle Außenwände mit Lehm verputzt, außen im Sockelbereich, der an den Abseiten hochgezogen ist, mit Faserzementplatten beplankt und darüber mit einer Boden-Deckelschalung verkleidet. Die Wände der Nischen bestehen aus innen verputzten und außen mit Faserzementplatten verkleideten 36 cm dicken Strohballen. In der Gebäudemitte ist eine Reihe tragender Holzstützen angeordnet, die die Spannweite der Decke und des Daches auf 4,8 m reduziert. Der Fußboden ist mit Strohballen (36 cm) auf Paletten gedämmt und mit einem Anhydritestrich versehen. Das begrünte Dach besteht aus 30 cm hohen, im Abstand von 1,2 m verlegten Sparren und ist mit 70 cm dicken Strohballen gedämmt. Die Innenwände bestehen im EG und teilweise im OG aus 17,5 cm dicken Grünlingen und sind als Sichtmauerwerk ausgeführt. Die verbleibenden OG-Wände sind in Trockenbauweise ausgeführt. Auch dieses Gebäude ist ein Passivhaus nach PHPP.

Tabelle 6.3: Daten zum nicht lasttagenden, zweigeschossigen Gebäude

EBF[1] (m²)	Überbaute Fläche (m²)	Bruttovolumen V_e (m³)	Firsthöhe (m)	Traufhöhe (m)	Bewohner	Q_H[2] (kWh/(m²a))
2x181,59	253	1895	7,83	0,0	2x5	13,2

[1]: Energiebezugsfläche nach PHPP; [2]: Jahresheizwärmebedarf nach dem Monatsverfahren des PHPP 2007. Abgesehen von Einbauwärmebrücken der Fenster wurden keine Wärmebrücken berücksichtigt. Aufgrund der hohen Wandstärken ist zu erwarten, dass sich durch die geometrischen Wärmebrücken ein insgesamt negativer Wärmebrücken-Verlustkoeffizient ergibt. Details zu den Berechnungen siehe Anhang III.8



Ansicht von Norden

Abbildung 6.5: Skizzen zu dem zweigeschossigen, nicht lasttragenden Gebäude (2)

Ergebnisse, Diskussion und Schlussfolgerungen

1 Zu den hygroskopischen Sorptionseigenschaften von Stroh und der Gefährdung durch Schimmelpilze

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das hygroskopische Sorptionsverhalten von Weizen-, Gersten-, Roggen-, Dinkel- und Bohnenstroh sowie von Hanffasern, Switchgras und Miscanthus untersucht. Für alle untersuchten Materialien wurden Gleichungen nach der BET-Theorie zur Berechnung der absoluten Feuchte in Abhängigkeit von der umgebenden Luftfeuchte und Temperatur aufgestellt.
Dabei wurden keine signifikanten Unterschiede im Sorptionsverhalten der untersuchten Materialien festgestellt, was sich u.U. darauf zurückführen lässt, dass alle Materialien mit Ausnahme von Hanf und Bohnenstroh zur Familie der Süßgräser gehören.

Aus den Untersuchungen des Fraunhofer Instituts für Bauphysik (IPB) geht hervor, dass Stroh unterhalb einer Luftfeuchte von 75% garantiert schimmelfrei ist. Daraus leiten sich unter zur Hilfenahme der Gleichungen nach der BET-Theorie maximale garantiert schimmelfreie Feuchtegehalte von 9% bei Miscanthus bis zu 15% bei Gerste ab. Der durch das IPB ermittelte, garantiert schimmelfreie Bereich bis 75% rH gilt im Gleichgewichtszustand, bei optimaler Temperatur. Da diese Bedingungen in der Praxis in der Regel nicht zusammenfallen, kann davon ausgegangen werden, dass Strohballenkonstruktionen im mitteleuropäischen Raum in der Praxis in einem deutlich größeren Feuchtebereich schimmelfrei bleiben.
Um den Einsatzbereich von Strohballen darüber hinaus zu erweitern, könnten die Ballen mit Fungiziden ausgerüstet werden. Eine andere Möglichkeit stellt die Herabsetzung des freien Wassers durch Salze, z.B. Borsalz dar. Da Schimmelpilze zum Entstehen Sporen benötigen, die sich überall in der Luft und an allen Materialien, so auch in Strohballen befinden, besteht außerdem die Möglichkeit, diese Sporen abzutöten. Dies könnte durch ein kurzfristiges Erhitzen der Ballen, z.B. durch Mikrowellen oder durch eine intensive radioaktive Bestrahlung erfolgen. Jedoch ist stark in Zweifel zu ziehen, ob diese Maßnahmen ökonomisch und vor allem ökologisch sinnvoll sind.
Strohballen gelten als ökologische Baustoffe. Eine Behandlung mit Fungiziden, Salzen oder Strahlen würde sich zu dieser Einstufung kontraproduktiv auswirken.
Hinsichtlich der Unterscheidung der untersuchten Materialien bezüglich ihrer Schimmelanfälligkeit konnte in dieser Dissertation keine Aussage getroffen werden. Hier sind weitere Untersuchungen erforderlich.

2 Zur Herstellung von Baustrohballen

Es wurde festgestellt, dass die Festigkeit von Strohballen wesentlich von der Halmbeschaffenheit abhängt. Dabei wirkt sich eine zerstörte Halmstruktur negativ auf die Ballenfestigkeit aus. In nicht lasttragenden Strohballengebäuden ist die Festigkeit der Strohballen von geringerer Bedeutung als in lasttragenden Gebäuden. Der Einsatz von Strohballen mit stark beschädigten Halmstrukturen, sollte, sofern erforderlich, daher auf nicht lasttragende Konstruktionen beschränkt werden.
Stroh wird vor allem bei der Ernte, explizit durch den Dreschvorgang hoch belastet. Als strohschonend konnten Mähdrescher mit Tangentialdreschwerk ohne nachgeschaltete Abscheidetrommeln identifiziert werden. Axiale Dreschwerke zerstören die Halmstruktur weitgehend. Sie sollten nicht zum Dreschen von Stroh für Baustrohballen eingesetzt werden.

Einflussfaktoren auf die Qualität der Strohballenproduktion wurde hinsichtlich der Ballendichte, Kanten- und Dimensionstreue sowie der gleichmäßigen Pressung experimentell am Beispiel von HD-Kleinballen untersucht. Es konnte eine Verbesserung der Kantentreue und Oberflächenbeschaffenheit mit zunehmender Dichte beobachtet werden.
Es zeigte sich, dass die Ballendichte mit der pro Kolbenstoß der Presse verdichteten Strohmenge steigt.
Um eine möglichst hohe Strohmasse pro Kolbenstoß zu verdichten, ist eine schnelle Fahrt des Traktors bei gleichzeitig niedriger Zapfwellendrehzahl erforderlich.
Steht ein Schlepper zur Verfügung, bei dem die Zapfwellendrehzahl unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit ist, sollte die Zapfwellendrehzahl möglichst niedrig gewählt werden.
Die Presse sollte stets an ihrer Auslastungsgrenze betrieben werden, um dichte Ballen zu produzieren. Indikator für eine hohe Auslastung ist eine volle Pickup. Diese hohe Auslastung kann durch eine schnelle Fahrt bei kleinen Schwaden oder eine langsamere Fahrt bei entsprechend größeren Schwaden erreicht werden. Die Schwadgröße ist einerseits vom Strohertrag, andererseits von der Arbeitsbreite des Mähdreschers abhängig. Kann nur mit niedriger Geschwindigkeit gefahren werden

oder sind kleine Schwade vorhanden, können diese mit sogenannten Schwadern zusammengelegt werden.
Eine weitere Erhöhung der Dichte kann weiterhin durch eine seitliche Kanalverengung, z.B. durch Einbau von Sperrholzplatten in den hinteren Teil des Presskanales erreicht werden. Im untersuchten Bereich konnten Dichteerhöhungen von 4% je cm Kanalverengung gemessen werden.
Es wurde beobachtet, dass die Toleranzen in der Ballenlänge mit steigender Dichte abnahmen. Um die Längentoleranzen weiter zu verringern, könnte es vorteilhaft sein, den Antrieb des Knoters unabhängig vom Hauptantrieb zu machen und den Auslösezeitpunkt nicht über die Länge des Pressstranges sondern über die verdichtete Masse zu steuern. Dies erfordert allerdings eine aufwändige Steuerungs- und Regelungstechnik, die auf der Erfassung verschiedener Parameter wie Strohmenge, Strohbeschaffenheit und Fahrgeschwindigkeit basiert. Moderne Quaderballenpressen verfügen über solche Regeleinrichtungen.
Bei gleichen Einstellungen an der Presse und konstanter Fahrgeschwindigkeit wurden Schwankungen in der Trockendichte um 21% registriert. Diese Dichteschwankungen können in erster Linie mit Schwankungen im Gutstrom, also durch einen unregelmäßigen Schwad bzw. durch eine ungleichmäßige Fahrweise erklärt werden. Die Veränderung der Schwadgrößen zur Reduzierung der Schwankungen in der Ballendichte mit den oben erwähnten Maßnahmen erscheint jedoch als unverhältnismäßig aufwändig. Durch ein mechanisches Entkoppeln des Kolbens vom Querförderer, Raffer und der Pickup kann alternativ der Pressvorgang auf die geförderte Menge angepasst werden.
Insgesamt zeigte sich, dass marktübliche HD-Ballenpressen bei Optimierung der Fahrweise und der Pressbedingungen zur Baustrohballenproduktion geeignet sind. Allerding wären weitere Verbesserungen hinsichtlich der Maßhaltigkeit, Gleichmäßigkeit und Dichte der Ballen wünschenswert.

Moderne Quader- oder Großballen-, kurz Q-Ballenpressen produzieren gleichmäßigere und dichtere Ballen mit geringeren Maßtoleranzen als HD-Kleinballenpressen. Sie verfügen über eine elektronische Steuerung, die es ermöglicht, den Pressvorgang an den Gutstrom, abhängig von der gegebenen Schwadgröße und der Fahrgeschwindigkeit, anzupassen. Dies wird z.B. durch die Vorkompression des Strohs in einer Vorkammer erreicht. Erst, wenn diese Vorkammer vollständig gefüllt ist, gelangt es in den eigentlichen Presskanal und wird vom Kolben verdichtet.

Aufgrund der strukturell besseren Eigenschaften von Quaderballen stellt sich hier die Frage, warum nicht prinzipiell diese an Stelle von HD-Ballen eingesetzt werden.
Aufgrund der Abmessungen von Quaderballen ist der Einsatz jedoch nicht immer sinnvoll. Z.B ist es in Regionen mit hohen Baulandpreisen ökonomisch nicht rentabel mit den resultierenden großen Wandstärken zu bauen. Weiterhin sind in Dachkonstruktionen mit Quaderballen deutlich tragfähigere und damit teurere Konstruktionen erforderlich, um das hohe Gewicht der Quaderballen sicher abzutragen. Unter Umständen könnten die Einsatzmöglichkeiten von Q-Ballen durch das Schneiden von Q-Ballen verbessert werden. Es scheint lohnenswert, den im Rahmen der Dissertation entwickelten Sägeprototypen für HD-Strohballen so weit zu vergrößern, dass auch Quaderballen geschnitten werden können, um den Einsatzbereich dieser Ballen zu erweitern.

3 Zum elastomechanischen Verhalten von Strohballen und Strohballenwänden

3.1 Spannungs-Stauchungsverhalten

Das elastomechanische Verhalten von Strohballen verschiedener Stroh- bzw. Pflanzenarten und Strohballenwänden aus Weizenstroh wurde im Rahmen dieser Dissertation in mehr als 200 Tests untersucht, die bis zu 84 Tage dauerten. Alle folgenden Angaben zu Elastizitätsmodulen, Stauchungen, zum Relaxations- und Kriechverhalten von Strohballen und Wänden aus Strohballen beziehen sich, so nicht anders erwähnt, auf Weizenstroh.

Es wurden Unterschiede im ***Spannungs-Stauchungsverhalten von HD-Ballen*** unterschiedlicher Stroh-bzw. Pflanzenarten ermittelt. Aufgrund der geringen Probenzahl und der unterschiedlichen Produktionsbedingungen der Ballen konnten jedoch nur Tendenzen aufgezeigt werden. Besonders geeignet scheinen Ballen aus Weizen-, Roggen- und Dinkelstroh, bei hochkant liegender Orientierung Ballen aus Gerstenstroh zu sein. Um hier belastbare Ergebnisse zu erzielen, sollten Tests mit Stroh-

ballen durchgeführt werden, deren Stroh unter vergleichbaren Bedingungen kultiviert, gedroschen und gepresst wurde.

Unabhängig von der Strohart und der Halmausrichtung steigt der Elastizitätsmodul von Strohballen und Strohballenwänden mit zunehmender Trockendichte. Folglich weisen dichtere Ballen bei gleicher Belastung eine geringere Stauchung auf als weniger dichte. Bei hochkant liegenden Ballen ist dieser Effekt besonders deutlich.
Eine höhere Trockendichte impliziert weniger Lufteinschlüsse im Ballen. Da die Lufteinschlüsse nicht zur Ballenfestigkeit beitragen, ist eine Erhöhung des E-Moduls mit der Erhöhung der Ballentrockendichte evident.

Der Elastiziätsmodul von hochkant liegenden Ballen bzw. von Wänden aus hochkant liegenden Ballen liegt über dem Elastizitätsmodul von flach liegenden Ballen bzw. von Wänden aus flach liegenden Ballen. Der Elastizitätsmodul von stehenden Strohballen liegt unter dem flach liegender Ballen. Das bedeutet, dass hochkant liegende Ballen bei gleicher Spannung und gleicher Trockendichte eine geringere Stauchung aufweisen als flach liegende und flach liegende als stehende Ballen.
Bei hochkant liegenden Ballen stehen die Halme wie Rohre gegen die Belastungsrichtung. Bei flach liegenden und stehenden Ballen liegen diese Rohre in Belastungsrichtung. Es ist leicht vorstellbar, dass sich die liegenden Rohre leichter zusammendrücken lassen als die stehenden Rohre. Bei den stehenden Ballen ist das Verhältnis zwischen Ballenhöhe und Ballenbreite ungünstiger als bei flach liegenden Ballen, daraus resultiert der geringere E-Modul der stehenden Ballen.
Dieses Ergebnis spricht für den Einsatz hochkant liegender Strohballen im lasttragenden Strohballenbau.

Weiterhin wurde das ***Spannungs-Stauchungsverhalten*** von drei hochkant liegende ***Quaderballen*** aus Weizenstroh untersucht. Es wurde festgestellt, dass hochkant liegende Quaderballen deutlich höhere Elastizitätsmodule aufweisen als HD-Ballen bei gleicher Ausrichtung und Dichte. Dieser Effekt wird auf die größeren Abmessungen der Quaderballen zurückgeführt, bei denen sich die Halme besser stabilisieren als bei den kleineren HD-Ballen. Zusätzlich weisen Quaderballen produktionsbedingt einen höheren Anteil liegender Halme auf, die Struktur ist inhomogener. Diese Tatsache könnte zu einem besseren Verbund der Halme untereinander und so zu dem höheren E-Modul beitragen. Evtl. trägt auch die sechsfache Schnürung (zweifach bei HD-Ballen) zur Stabilisierung bei. Der im Vergleich zu hochkant liegenden HD-Ballen höhere Elastizitätsmodul von hochkant liegenden Quaderballen impliziert einen bevorzugten Einsatz hochkant liegender Quaderballen im lasttragenden Strohballenbau.

Der ***Elastizitätsmodul von Wänden*** aus Strohballen liegt bei gleicher Trockendichte über dem Elastizitätsmodul von Einzelballen. In der Mehrzahl der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Tests wurden Einzelballen seitlich eingespannt. Dadurch konnte die Querdehnung und so auch die Stauchung in Belastungsrichtung verringert werden. Damit erhöht sich der Elastizitätsmodul.
Die Wände wurden mittels seitlicher Begrenzungselemente ebenfalls eingespannt. Dabei war die Einspannung der Wände effizienter, d.h. die Querdehnung der Wände wurde besser verhindert als die der Ballen. Daraus ergibt sich ein höherer E-Modul für die Wände. Außerdem werden die Strohballen durch den Aufbau der Wände vorkomprimiert. Auch diese trägt zu einer Verringerung der Stauchung im Test und damit zu einer Erhöhung des E-Moduls bei.

Der ***Elastizitätsmodul lehmverputzter Strohballen und lehmverputzter Wände aus Strohballen*** liegt deutlich höher als der unverputzter Strohballen und unverputzter Wände aus Strohballen. Dies wird auf die Verbundwirkung von Stroh und Putz zurückgeführt, die sich wie ein Sandwichelement verhalten. Ein weicher Kern (Stroh) hält eine harte dünne Schale (Lehmputz) zusammen. Dabei wird die Last hauptsächlich durch die dünne Schale abgetragen. Die Verbindung mit dem Stroh bewirkt, dass diese dünne Schale nicht bzw. nicht so schnell ausknickt.
Dabei ist es wichtig, wie der Putz belastet wird. Wenn die Lasteinleitung in den Strohballen und vom Strohballen in den Putz erfolgt (indirekte Belastung), die Lasteinleitungsplatte also nicht auf dem Putz aufliegt, kommt es zu Rissen im Putz und zu einem niedrigeren Elastizitätsmodul als bei direkt belastetem Putz. Wird der Putz direkt belastet (Lasteinleitungsplatte liegt auf dem Putz auf), ergeben sich höhere Elastizitätsmodule und damit niedrigere Stauchungen.
Die vorliegenden Ergebnisse sprechen damit für eine direkte Belastung des Putzes.

Ein wesentliches Element bei lasttragenden Strohballenkonstruktionen ist der Ringanker, welcher die Lasten aus der Dachkonstruktion oder evtl. aus Zwischendecken gleichmäßig auf die Wände verteilt. Mit zunehmender Wandstärke wird dieser Ringanker aufwändiger und damit teurer. Durch eine ***Teilbelas-***

tung von flach- und hochkant liegenden Einzelballen wurde untersucht, wie sich eine Verringerung der Breite des Ringankers auf das Spannungs-Stauchungsverhalten auswirkt. Es wurde festgestellt, dass die Stauchung durch die Verringerung der Lasteinleitungsbreite zunimmt. Besonders deutlich ist dies bei hochkant liegenden Ballen, bei denen die Querverteilung der Lasten durch die stehenden Halme deutlich schlechter ist als bei flach liegenden Strohballen. Dieses Ergebnis spricht für den Einsatz von flach liegenden Ballen im lasttragenden Strohballenbau.

3.2 Relaxationsverhalten

Eine Abhängigkeit der Relaxation von der Trockendichte konnte für flach liegende Ballen nicht nachgewiesen werden.

Hochkant liegende Ballen und Wände aus hochkant liegenden Ballen unterlagen im Langzeittest einer höheren Relaxation als flach liegende Ballen und Wände aus flach liegenden Ballen. Dieses Ergebnis spricht für den Aufbau lasttragender Strohballenwände aus hochkant liegenden Strohballen.

Im Allgemeinen soll eine Setzung, also eine Verringerung der Höhe von Strohballenwänden, während der Nutzungsphase vermieden werden. Eine Setzung findet dann statt, wenn die beim Bau aufgebrachte Vorspannung durch die Relaxation unter den Wert der auf der Wand aufliegenden Last fällt. Soll eine Wand aus hochkant liegenden Strohballen zum Einsatz kommen, muss diese, da sie eine höhere Relaxation aufweist, stärker vorgespannt werden als eine Wand aus flach liegenden Ballen.

Ein mehrfaches Vorspannen bzw. Belasten von flach oder hochkant liegenden Ballen bedingt eine geringere Reflexion. Wird eine Strohballenwand vorgespannt, so baut sich die Spannung in den ersten Minuten am schnellsten ab. Wird die Spannung nun nach z.B. 10 Minuten wieder auf den Anfangswert erhöht, baut sich die Spannung langsamer ab als nach der ersten Belastung. Durch ein wiederholtes Aufbringen der Anfangsvorspannung kann also die Vorspannung, die ein Setzen des Gebäudes in der Nutzungsphase ausschließt, reduziert werden.

Das ***Versagen der Ballenbindung*** hat bei eingespannten Strohballen nur einen geringen Einfluss auf den Spannungsabbau. Dieser Einfluss ist bei hochkant liegenden Ballen größer als bei flach liegenden, da die Ballenbindung hochkant liegende Ballen zusätzlich seitlich stabilisiert. Für Wände aus Strohballen wird ein noch geringerer Effekt des Versagens der Ballenbindung auf das Relaxationsverhalten prognostiziert, da hier die Einspannung effizienter wirkt als bei den Einzelballen. Dieser Effekt spricht für die Verwendung von flach liegenden Strohballen in lasttragenden Wandkonstruktionen.

In mehreren Tests wurde der ***Einfluss eines Wasserschadens*** auf das Relaxationsverhalten verputzter und unverputzter, flach- und hochkant liegender Strohballen untersucht. Die Spannung fiel durch den simulierten Wasserschaden innerhalb von Sekunden drastisch auf ca. 10-28% des Ausgangswertes Die höchsten Restspannungen wiesen dabei unverputzte hochkant liegenden Weizenballen auf.
Nun stellte sich die Frage, ob der beobachtete rapide Abbau der Spannung nach einem Wasserschaden ein Ausschlusskriterium für den lasttragenden Strohballenbau ist. Letztlich spielt die Relaxation selbst in diesem Zusammenhang eine untergeordnete Rolle. Wichtig ist, wie die Relaxation sich auf das Kriechverhalten des Ballens auswirkt. Um dies zu klären, wurde je ein flach und hochkant liegender Strohballen in einem speziellen kombinierten Relaxations-Kriechtest untersucht. Durch diesen Test konnte nachgewiesen werden, dass ein Wasserschaden nicht zu einer akuten Einsturzgefährdung eines lasttragenden Strohballengebäudes führt. Vermutlich zieht ein Wasserschaden, vor allem wenn er unbemerkt bleibt, aber Schimmelpilzprobleme nach sich.

3.3 Kriechverformung

Eine Korrelation zwischen der Ballentrockendichte und der Kriechverformung konnte nicht nachgewiesen werden. Die Verformungsgeschwindigkeit nimmt mit der Zeit ab, kommt aber im betrachteten Zeitraum von maximal einem Monat nicht zum Erliegen. Smith (2003) kam bei seinen Versuchen zum Kriechverhalten von Strohballenwänden jedoch zu dem Ergebnis, dass sich Wände aus flach liegenden Strohballen nach ca. 15 Wochen, Wände

aus hochkant liegenden Ballen nach ca. 44 Wochen stabilisieren. Smith führte sein Versuche jedoch mit deutlich niedrigeren Spannungen durch.

Die Kriechverformung steigt mit steigender Spannung. Je höher die auf einen Ballen einwirkende Spannung, umso höher ist seine Kriechverformung. Dieses Verhalten ist analog zum Spannungs-Stauchungsverhalten und scheint evident.

Hochkant liegende Ballen unterliegen einer geringeren Kriechverformung als flach liegende Ballen. Dieser Effekt ist analog zum Spannungs-Stauchungsverhalten von flach- und hochkant liegenden Strohballen, entspricht jedoch nicht dem Relaxationsverhalten der Ballen.

Soll eine Kriechverformung von lasttragenden Strohballengebäuden zugelassen werden, wird der Einsatz hochkant liegender Ballen empfohlen

3.4 Diskussion zur Konstruktion und zum Aufbau von lasttragenden Wänden aus Strohballen

Lasttragende Strohballenwände sollten mit seitlicher Begrenzung erstellt werden. Diese Maßnahme erhöht den Elastizitätsmodul und senkt die Relaxationsverluste. Außerdem bieten die seitlichen Begrenzungselemente Anschlusspunkte für Fenster und Türen. Zudem vereinfachen sie nach den Erfahrungen des Verfassers den Aufbau der Wände erheblich. Werden keine seitlichen Begrenzungselemente eingesetzt, muss mit einer höheren Stauchung und einer höheren Relaxation bzw. einer höheren Kriechverformung gerechnet werden.

Werden seitliche Begrenzungen eingesetzt, erzeugt eine Vertikalspannung eine Horizontalspannung, welche die seitlichen Begrenzungselemente auseinander drückt. Dabei ist die durch die Vertikalspannung erzeugte Horizontalspannung bei Wänden aus flach liegenden Ballen geringer als bei Wänden aus hochkant liegenden Ballen. Um die oben beschriebenen positiven Effekte der seitlichen Begrenzung zu nutzen, müssen die seitlichen Begrenzungen zusammengehalten werden. Eine Möglichkeit dazu ist die Verbindung der seitlichen Begrenzungselemente durch Schwelle, Ringbalken und Horizontalelemente, siehe unten.

Horizontal in die Wand eingelegte Elemente sichern die Wand gegen Ausbeulen und erhöhen damit die Knickstabilität. Außerdem können die seitlichen Begrenzungen über die Horizontalelemente, die so als Zugelemente fungieren können, verbunden werden. Der Einsatz der Horizontalelemente als Zugglieder wirkt sich positiv auf die Dimensionierung der seitlichen Begrenzungselemente aus. Zusätzlich können an den Horizontalelementen außen Wetterschalen und innen z.B. Hängeschränke angebracht werden. Nach den US-amerikanischen Buildingcodes dürfen nicht unterstützte Strohballenwände wegen der Gefahr des Ausknickens maximal fünf mal so hoch wie dick sein. Bei einer Strohballenwand aus hochkant liegenden HD-Ballen würde dies eine maximale Wandhöhe von 1,8 m bedeuten. Wird auf Horizontalelemente verzichtet, sind lasttragende Wände aus hochkant liegenden HD-Kleinballen aus diesem Grund praktisch nicht vorstellbar.

Analog zu den amerikanischen Buildingcodes wird vorgeschlagen, eine Wand bis zu einer Spannung von maximal 20 kN/m² zu belasten. In Deutschland darf der Putz bisher nicht als tragendes Element berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wird bei den folgenden Betrachtungen von unverputzten Wänden ausgegangen.

Unter der Annahme, dass sich lasttragende Wände während der Nutzungszeit nicht setzten dürfen, muss eine Kriechverformung ausgeschlossen werden. Dies kann durch eine Vorspannung gewährleistet werden. Da die Vorspannung der Relaxation unterliegt, also abgebaut wird, muss die Vorspannung so gewählt werden, dass sie während der Nutzungsdauer des Gebäudes nicht unter die maximale Spannung, die im Betrieb der Wand auftreten kann, fällt.
Wie oben beschrieben, unterliegen Wände aus hochkant liegenden Strohballen einer höheren Relaxation als Wände aus flach liegenden Strohballen. Aufgrund der in dieser Dissertation durchgeführten Tests wird für seitliche eingespannte Wände, die mit maximal 20 kN/m² belastet werden, eine Vorspannung empfohlen, die bei Wänden aus hochkant liegenden Strohballen das 3-fache, bei Wänden aus flach liegenden Ballen das 2-fache der Maximalspannung beträgt. Bei einer Maximalspannung von 20 kN/m² ergibt sich so bei Wänden aus hochkant liegenden Strohballen eine Vorspannung von 60 kN/m², bei Wänden aus flach liegenden Strohballen ergibt sich eine Spannung von 40 kN/m².

Aufgrund des höheren Elastizitätsmoduls von Wänden aus hochkant liegenden Strohballen gegenüber Wänden aus flach liegenden Strohballen ergibt sich für die oben genannten Bedingungen eine Vorkomprimierung für seitlich eingespannte Wände von 10% beim Einbau hochkant liegender- und 14% beim Einbau flach liegender Ballen bezogen auf die Anfangshöhe. Es muss angemerkt werden, dass sich das Aufbringen einer so hohen Komprimierung auf der Baustelle als äußerst aufwändig darstellt. Eine mögliche Lösung ist die elementierte Vorfertigung lasttragender Strohballenwandelemente. Dabei kann die Vorkomprimierung der Elemente in einer stationären Anlage erfolgen. Ein weiterer Vorteil einer Vorfertigung besteht darin, dass sie Witterungsgeschützt in einer Halle erfolgen kann. Die Elemente bräuchten auf der Baustelle dann nur noch zusammengesetzt werden. Diese Maßnahme würde die Witterungsabhängigkeit des lasttragenden Strohballenbaus deutlich reduzieren.
Wird die Komprimierung nicht auf ein Mal, sondern durch z.B. mehrfaches nachziehen von Spannelementen aufgebracht, sind niedrigere Vorspannungen als die erwähnten erforderlich.

Unter der Annahme, dass sich lasttragende Strohballenwände während der Nutzungszeit setzten dürfen, kann eine Kriechverformung zugelassen zu werden. Wiederum ausgehend von einer Maximalspannung von 20 kN/m², einer Vorspannung in derselben Höhe und unverputzen Wänden stellt sich die Frage, in welcher Höhe eine Kriechverformung maximal auftreten würde. Smith (2003) kommt, wie oben beschrieben, zu dem Ergebnis, dass Wände aus flach liegenden Strohballen nach 15 Wochen nicht weiter kriechen, Wände aus hochkant liegenden Ballen nach 44 Wochen. Unter dieser Prämisse wird aufgrund der in dieser Dissertation durchgeführten Kriechversuche mit HD-Einzelballen für Wände aus hochkant liegenden Ballen eine ultimative Setzung von 1,7%, für Wände aus flach liegenden Ballen eine Setzung von 3,1% prognostiziert. Bei dieser Berechnung wurde angenommen, dass das Kriechverhalten von Einzelballen zu Strohballenwänden analog zu dem Spannungs-Stauchungsverhalten von Einzelballen zu Strohballenwänden ist, d.h. es wurden die in Teil II Abschnitt 5.10.1 genannten und erläuterten Abminderungsfaktoren eingesetzt.
Bei einer 2,5 m hohe Strohballenwand würden die oben genannten prozentualen Setzungen beim Einsatz flach liegender Ballen eine absolute Setzung von knapp 7,75 cm, bei einer Wand aus hochkant liegenden Ballen 4,25 cm bedeuten. Die Formänderungen entsprechen in der Größenordnung denen des Holzes in Blockhäusern durch Quellen und Schwinden. Evtl. können Anschlussdetails z.B. von Fenstern, Türen und nicht-Strohballenwänden vom Blockbau für setzungstolerante Strohballenhäuser übernommen werden.
Konstruktionen, die mit niedrigen Vorspannungen arbeiten, werden in Europa z.B. von Werner Schmidt (Schweiz) und Amazon Nails (UK) erfolgreich errichtet.

4 Statische Möglichkeiten und Grenzen von lasttragenden Strohballenkonstruktionen

Zur Abschätzung der statischen Möglichkeiten und Grenzen lasttragender Strohballenkonstruktionen wurden die Flächenlasten inkl. Verkehrslasten von strohballengedämmten Dachkonstruktionen mit verschiedenen Dacheindeckungen (Gründach q= 3,5 kN/m², Betondachsteine q= 2,4 kN/m², Faserzementwellplatten q= 2 kN/m²) und einer Zwischendecke (q= 2,5 kN/m²) ermittelt. Auf dieser Basis wurden die maximal möglichen Dach- bzw. Deckenspannweiten bei einer Spannung verschiedener dicker lasttragender Strohballenwände von 20 kN/m² am Wandkopf berechnet. Bei allen Berechnungen wurde von einem Öffnungsanteil der Wand von 1/3 bezogen auf die mittlere Wandlänge ausgegangen.

Bei eingeschossigen, lasttragenden Strohballengebäuden aus hochkant liegenden HD-Ballen sind mit Gründächern 2,6 m, mit Betondachsteinen 3,8 m und mit Wellfaserzementplatten 4,5 m Spannweite bei 2-seitig aufgelegten Dächern möglich. Werden die Dächer vierseitig aufgelegt (z.B. Pyramidendach, quadratischer Grundriss), können die Spannweiten sogar fast verdoppelt werden. Damit können selbst mit hochkant liegenden HD-Ballen und Gründächern kleinere Gebäude ohne zusätzliche tragende Teile erstellt werden.
Kommen Quaderballen zum Einsatz, sind deutlich höhere Spannweiten möglich. Mit den größten verfügbaren Strohballen ließen sich theoretisch Spannweiten von über 24 m bei leichten Dacheindeckungen realisieren, was Möglichkeiten im Hallenbau eröffnen würde. Da die Dachlast bei solchen Spannweiten zunächst in Trägern konzentriert wird, aus denen die Last dann wieder gleichmäßig auf die Wände verteilt werden müsste, was den Einsatz massiver Ringbalken erfordern würde, ist

die ökonomische und ökologiche Sinnhaftigkeit solcher Konstruktionen fraglich und bedarf der Klärung im Einzelfall. Eine vielversprechende Möglichkeit, weit gespannte Tragwerke ausschließlich mit Strohballen zu realisieren, könnten in Zukunft lasttragende Tonnengewölbe sein.
Werden im EG 90 cm dicke Quaderballen und im OG 36 cm dicke HD-Ballen eingesetzt, lassen sich bei vierseitiger Auflage der Decke und des Zementfaserplatten gedeckten Daches Spannweiten von über 8 m erreichen. Mit diesen Spannweiten lassen sich durchaus Einfamilienhäuser erstellen. Eine über 8 m spannende allseitig aufgelegte Decke kann als Kassettendecke aus Holz oder als Stahlbetondecke ausgeführt werden. Im Fall der Stahlbetondecke würden jedoch massive Wärmebrückenprobleme auftreten, da die Decken bei lasttragenden Strohballenwänden auf der gesamten Wandkonstruktion aufliegen müssen.
Kommen die größten verfügbaren Strohballen zum Einsatz, die Wandstärken von 1,3 m ermöglichen, sind auch 3-geschossige lasttragende Gebäude mit leichten Dächern denkbar. Auch hier können Spannweiten von über 8 m erreicht werden. Bei einem solchen Gebäude würden im 1. OG 90 cm starke Wände, im 2. OG 36 cm starke Wände zum Einsatz kommen.

Die Berechnungen zeigen eindrucksvoll, welches große Spektrum durch lasttragende Strohballenkonstruktionen, die mit einer Spannung von 20 kN/m² belastet werden bei einem Öffnungsanteil von 1/3, bezogen auf die mittlere Wandlänge, abgedeckt werden kann. Durch den Einsatz hybrider Konstruktionen, z.B. durch den Einsatz tragender Innenwände oder Stützen kann der Einsatzbereich nochmals deutlich erweitert werden.

5 Zum Primärenergiegehalt von Strohballen und Strohballenkonstruktionen

Der Primärenergieinhalt (PEI) von Strohballen wurde in Abhängigkeit von der verwendeten Strohballenpresse, dem verwendeten Mähdrescher, dem Strohertrag, der Feldgröße und der Entfernung vom Feld zum Hof im Rahmen dieser Arbeit ermittelt.
Positiv auf den PEI wirken sich kurze Entfernungen zum Hof, große Felder, hohe Erträge und große Mähbreiten aus. Großballenpressen arbeiten effizienter als Kleinballenpressen.
Als Rechenwerte werden 50 kWh/Mg für Quaderballen und 63 kWh/Mg für HD-Ballen vorgeschlagen.
Diese Werte gelten für die Annahme, dass Stroh als Nebenprodukt der Getreideproduktion anfällt. Der Energie- und Stoffeinsatz zur Kultivierung des Getreides geht dabei nicht in die Berechnung mit ein. Wird die zur Kultivierung des Getreides benötigte Energie den Strohballen zugeschlagen, errechnet sich für Quaderballen ein PEI von 300 kWh/Mg.
Da Quaderballen in der Regel eine höhere Dichte aufweisen als HD-Ballen, gleichen sich die Primärenergieinhalte im Volumenbezug an.
Den größten Anteil am PEI von Strohballen hat mit bis zu 52% das Ballengarn. Wird hier ein Material verwendet, das seinerseits einen geringen Primärenergieinhalt aufweist, könnte auch der PEI der Strohballen deutlich reduziert werden. Dies scheint aber aufgrund der ohnehin niedrigen Werte nicht dringlich zu sein.
Verglichen mit anderen Baustoffen weisen Strohballen einen ausgesprochen geringen Primärenergieverbrauch auf. So muss zur Produktion eines Mg extrudierten Polystyrols (XPS) die 560-fache Energiemenge aufgewendet werden wie für die Produktion eines Megagramms Quaderballen. Da XPS jedoch eine deutlich geringere Dichte und einen niedrigeren Leitwert als Stroh hat, wird für eine Strohballendämmung nur etwa sechsmal weniger Energie benötigt, als für eine XPS-Dämmung bei gleichem Wärmedurchgangskoeffizienten.

Aufbauend auf die in dieser Arbeit ermittelten Primärenergieinhalte von Strohballen wurden die Primärenergieinhalte von Strohballenkonstruktionen berechnet. In diese Berechnungen gehen die Primärenergieinhalte des Strohs, der benötigten Holzteile, Putzträger, Putze, Mörtel und Befestigungs- sowie Verbindungsmittel und weiterer Materialien ein, die für den Aufbau der jeweiligen Wände benötigt werden. Der Energieaufwand für den eigentlichen Aufbau der Konstruktion auf der Baustelle und für den Sockel fließen nicht in die Berechnung ein.
Der niedrigste Primärenergiebedarf ergab sich für ein lasttragendes Tonnengewölbe gefolgt von einer Doppelskelettkonstruktion und einem fugenorientieren, ballenbündigen Skelett.
Dabei muss angemerkt werden, dass für das Gewölbe und das Doppelskelett hochkant liegende HD-Ballen (36 cm Wandstärke), für das fugenorientierte, ballenbündige Skelett stehende Q-Ballen (70 cm Wandstärke) verwendet wurden.
Die höchsten Primärenergieinhalte wiesen das AbZ- konforme Rahmensystem (aufgrund einer zusätzlich geforderten Dämmung an der Au-

ßenseite der Konstruktion) gefolgt von einem Schiebentragwerk (aufgrund des hohen Holzanteils) und dem System Gagné auf.
Diese Werte bis zum Faktor 10 niedriger als die Primärenergieinhalte konventioneller Konstruktionen mit gleichem U-Wert.
Außer dem ausgesprochen günstigen Wert des Strohballengewölbes sind die lasttragenden Konstruktionen im oberen Mittelfeld platziert.

Zusätzlich wurde der Einfluss von Bekleidungssystemen auf den Primärenergieinhalt der Konstruktionen untersucht. Am günstigsten schneiden Konstruktionen ab, die innen wie außen lehmverputzt sind.

Hier ist einzuwenden, dass vom Einsatz von Lehmputzen im Außenbereich in gemäßigten Klimazonen auf Grund der hohen Witterungsbelastung abgesehen werden sollte.
Holzverschalungen haben einen höheren Primärenergiebedarf als Lehmputze. Werden Kalk- oder Zementputz eingesetzt, erhöht sich der Primärenergiebedarf weiter.
Werden Primärenergieinhalt und Witterungsbeständigkeit betrachtet, kann die hinterlüftete Holzverschalung empfohlen werden, die zudem einen besseren Schutz des Strohs vor Feuchtigkeitsbelastungen durch Schlagregen bietet als die anderen Konstruktionen.

6 Zur Wärmeleitfähigkeit und zum Wärmedurchgangskoeffizienten von Strohballen und Strohballenkonstruktionen

Bei einem Wärmestrom parallel zur Faser ist die Wärmeleitfähigkeit höher als bei einem Wärmestrom senkrecht zur Faser. In der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung für Baustrohballen werden als Bemessungswerte für den Wärmestrom parallel zur Faser eine Wärmeleitfähigkeit von 0,08 W/mK, für einen Wärmestrom senkrecht zur Faser eine Wärmeleitfähigkeit von 0,052 W/mK festgesetzt.
Da flach liegende Strohballen einen Wärmestrom parallel zur Faser und hochkant liegende bzw. stehende Ballen einen Wärmestrom senkrecht zur Faser aufweisen, spricht der Aspekt Wärmeleitfähigkeit gegen den Einsatz flach liegender Strohballen.
Sollen flach liegende Strohballen dennoch zum Einsatz kommen, müssen, um den gleichen Wärmedurchgangskoeffizienten zu erreichen, entweder dickere Strohballen oder additive Dämmmaterialien eingesetzt werden. So hat ein hochkant liegender Ballen trotz seiner geringeren Dicke die bessere Wärmedämmung.

Für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Strohballenkonstruktionen wurden die Wärmedurchgangskoeffizienten U berechnet. Den mit Abstand schlechtesten U-Wert weist das System Gagné mit 0,7 W/(m²K) aufgrund des hohen Mörtelanteils und der damit verbundenen Wärmebrückenwirkung auf. Konstruktionen, bei denen flachliegende HD-Ballen zum Einsatz kommen, haben U-Werte zwischen 0,15 und 0,16 W/(m²K). Bei dem Einsatz hochkant liegender HD-Ballen wurden U-Werte um 0,14 W/(m²K) ermittelt. Ausnahmen stellen hier erstens das System Scheibentragwerk dar, welches aufgrund der eingesetzten massiven Holzplatte einen U-Wert von 0,12 aufweist. Die zweite Ausnahme bildet das Rahmensystem mit einem U-Wert von 0,16 W/(m²K), bedingt durch die Wärmebrückeneffekte der durchgehenden Holzständer. Mit Abstand am besten schneidet das fugenorientierte ballenbündige Skelett mit einem U-Wert von 0,07 W/(m²K) durch den Einsatz stehender, 70 cm starker Q-Ballen ab.

Für Passivhäuser wird im Allgemeinen von einem maximalen U-Wert von 0,15 W/(m²K) ausgegangen. An dieser Hürde scheitern das System Gagné und das Rahmensystem. Bei allen Konstruktionen, bei denen flach liegende Ballen eingesetzt werden, ist das Erreichen des Passivhausstandartes kritisch. Soll das Passivhauskriterium auch von Rahmensystemen eingehalten werden, ist eine Möglichkeit die Überdämmung der Konstruktion z.B. mit Holzweichfaserplatten. Dies ist beim AbZ-konformen Rahmensystem der Fall, das einen Wärmedurchgangskoeffizienten von 0,14 W/(m²K) aufweist. Eine andere Möglichkeit ist die Reduzierung der Wärmeverluste im Bereich der Rahmen durch den Einsatz von Stegträgern.
Es konnte gezeigt werden, dass mit der Verwendung von Strohballen der Passivhausstandard zwar nicht implizit ist, jedoch schon bei der Verwendung von hochkant liegenden bzw. stehenden HD-Ballen gute Möglichkeiten bestehen, diesen Standard zu erreichen. Dies beweisen auch die in Teil III Kapitel 6 angeführten Gestaltungsbeispiele, die bei der Verwendung von Quaderballen nahe legen, dass es möglich ist, durch solare und interne Gewinne mehr Energie zu „produzieren“ als durch Transmissions- und Lüftungsverluste entweicht.

7 Zum Energiebedarf über 50 Jahre (E_{50}) der untersuchten Konstruktionen

Mit dem E_{50}-Wert werden der Primärenergiebedarf und der U-Wert zusammengeführt. Der U-Wert ist ein Maß für die Transmissionswärmeverluste (Q_T) einer Konstruktion. Der auf einen Quadratmeter Wandfläche bezogene E_{50}- Wert setzt sich aus dem PEI einer Wand und dem 50-fachen des primärenergetisch bewerteten Jahrestransmissionswärmebedarfes zusammen und stellt damit den summierten Energiebedarf der entsprechenden Konstruktion über einen Zeitraum von 50 Jahren dar.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass der Anteil des PEI am E_{50}-Wert in allen Fällen den geringeren Anteil ausmacht. Werden Strohballen als Dämmstoff eingesetzt, lohnt es sich in jedem untersuchten Fall, mehr Primärenergie in eine bessere Wärmedämmung zu investieren. Bei konventionellen Konstruktionen ist dies nicht der Fall. Bei der untersuchten EPS gedämmten KS-Wand stellte sich ein Optimum bei einem U-Wert von ca. 0,08 W/(m²K) ein. Bei einer weiteren Senkung des U-Wertes wurde der Mehrbedarf an Primärenergie nicht durch die Einsparungen am bewerteten Transmissionswärmebedarf amortisiert.
Da der E_{50}-Wert der Strohballenkonstruktionen hauptsächlich von Q_T und damit vom U-Wert der entsprechenden Wandkonstruktion abhängt, ergibt sich für den E_{50}-Wert ein ähnliches Bild wie für den U-Wert. Am besten schneidet ein fugenorientiertes ballenbündiges Skelett aufgrund der hohen Dämmstoffstärke mit einem Gesamtenergiebedarf von 390 kWh ab. Ein Auto (Diesel, 7 l/100 km) käme mit dieser Energie insgesamt 325 km weit, pro Jahr des betrachteten Zeitraums von 50 Jahren wären das 6,5 km. Der höchste Energiebedarf wurde für das System Gagné mit über 3,3 GWh berechnet. Die lasttragenden Konstruktionen liegen im oberen Mittelfeld.

8 Arbeitsaufwand zur Herstellung von Strohballenkonstruktionen

Der Arbeitsaufwand zur Herstellung der untersuchten Strohballenkonstruktionen wurde durch Fuchs/Imhoff (2007), Scharmer (2007) und dem Verfasser qualitativ abgeschätzt.

Konstruktionsunabhängig wurden vorbereitende Arbeitsschritte und das Verputzen flach und hochkant liegender sowie stehender Ballen bewertet. Stehende Ballen schnitten dabei leicht besser ab als flach- und hochkant liegende, die in der Summe gleich bewertet wurden. Dabei sinkt der Aufwand für die vorbereitenden Arbeiten mit der Ballengröße.

Bei den *konstruktionsabhängigen* Vergleichen schnitt das ballenbündige Skelett am schlechtesten ab. Ihm wird ein Arbeitsaufwand von 100% zugeordnet. Auf dieser Basis bringt das System Scheibe, da hier kein Innenputz benötigt wird, mit 61% das beste Ergebnis, gefolgt vom ballenbündigen, fugenorientierten Skelett mit 74%. Alle anderen Konstruktionen liegen mit über 80% des Arbeitsaufwandes vom ballenbündigen Skelett deutlich höher. Die lasttragenden Konstruktionen liegen (mit Ausnahme des Tonnengewölbes 81%) mit durchschnittlich 94% eher im oberen Bereich der Skala.
Bei den untersuchten Konstruktionen machen die Stroharbeiten, das Verputzen und die Holzarbeiten im Mittel überschlägig je ein Drittel des Arbeitsaufwandes aus.
Das Verputzen von Strohballen wurde generell aufwändiger eingeschätzt als das Verschalen.

Hinsichtlich des Arbeitsaufwandes schneiden nicht lasttragende verschalte Konstruktionen, bei denen stehende Ballen zum Einsatz kommen, am besten ab.

9 Zur Ballenorientierung

Zur Abschätzung, welche Ballenorientierung – hochkant- bzw. flach liegend und stehend – am sinnvollsten eingesetzt wird, wurden folgende Kriterien herangezogen: 1. Elastizitätsmodul bei voller Belastung, 2. Elastizitätsmodul bei partieller Belastung, 3. Relaxationsverhalten, 4. Knickverhalten, 5. Wärmeleitfähigkeit, 6. Strohaufwand und Wanddicke, 7. konstruktionsunabhängiger Arbeitsaufwand. Die Bewertung wird in Tabelle 9.1 vorgenommen.

Tabelle 9.1: Bewertungskriterien und Bewertung der Ballenorientierungen

Kriterien	**Orientierung** HL	FL	S
E-Modul bei voller Belastung	+	-	-
E-Modul bei partieller Belastung	-	+	/
Relaxationsverhalten	-	+	-
Kriechverhalten	+	-	/
Wärmeleitfähigkeit	+	-	+
Strohaufwand und Wanddicke	+	-	+
Arbeitsaufwand	-	-	+
Knickverhalten	-	+	-

HL: hochkant liegend; FL: flach liegend; S: stehend; +: Kriterium spricht für den Einsatz; - Kriterium spricht gegen den Einsatz; / Kriterium nicht untersucht

Für den **lasttragenden Strohballenbau** sind stehende HD-Ballen aufgrund ihres geringen Elastizitätsmoduls und des ungünstigen Relaxationsverhaltens ungeeignet. Der höhere E-Modul sowie der niedrigere Wärmeleitwert und der geringere Stroheinsatz spricht für den Einsatz hochkant liegender Strohballen. Für flach liegende Ballen spricht hier das günstigere Relaxationsverhalten und der bessere E-Modul unter Teilbelastung sowie das günstigere Knickverhalten.
Werden *seitliche Begrenzungen und horizontale Elemente* eingesetzt und besteht die Möglichkeit, die höhere Relaxation durch das Aufbringen einer höheren Vorspannung zu kompensieren, wird der Einsatz hochkant liegender Ballen empfohlen. Unter der Prämisse, dass Setzungen während der Nutzungsdauer des Gebäudes zugelassen werden sollen, seitliche Begrenzungselemente und Horizontalelemente bzw. größere Ballen zur Verbesserung der Knickstabilität eingesetzt werden können, sei auf das günstigere Kriechverhalten hochkant liegender Ballen hingewiesen. Auch in diesem Fall wird der Einsatz hochkant liegender Ballen empfohlen.
Soll auf seitliche Begrenzungen verzichtet werden, soll die Last nur teilweise eingebracht werden, und wird nur geringer Wert auf Strohverbrauch und Wärmeleitfähigkeit gelegt, können auch flach liegende Ballen eingesetzt werden.

Bei **nicht lasttragenden Konstruktionen** spielen der Elastizitätsmodul und das Relaxationsverhalten eine untergeordnete Rolle. Hier sind hochkant liegende und stehende Ballen flach liegenden Ballen aufgrund der niedrigeren Wärmeleitfähigkeit und des geringeren Strohverbrauches zu empfehlen. Zusätzlich spricht der Arbeitsaufwand für stehende Ballen. Daher sollten in nicht lasttragenden Konstruktionen stehende Ballen bevorzugt eingesetzt werden.
Da beim Innen- und ballenbündigen Skelett prinzipiell keine hochkant liegenden oder stehenden Ballen eingesetzt werden können und diese zudem einen hohen Primärenergieinhalt aufweisen, wird empfohlen, diese Konstruktionen nicht einzusetzen.

10 Lasttragende versus nicht lasttragende Bauweise

In der *Einleitung und Problemstellung* dieser Dissertation wurde davon ausgegangen, dass lasttragende Konstruktionen nicht lasttragenden Konstruktionen ökonomisch wie ökologisch überlegen seien. Dieser Ausgangspunkt soll nun diskutiert werden.
Zur Bewertung des Kriteriums Ökologie wird der E_{50}-Wert herangezogen. Dabei ist klar, dass eine Reduktion des Ökologiebegriffes auf den Energieverbrauch sehr kurz greift. Da aber in lasttragenden und nicht lasttragenden Strohballenkonstruktionen die gleichen Baustoffe in ähnlichen Mengen eingesetzt werden, ist die vorgeschlagene Reduktion nach Meinung des Verfassers in diesem Fall zulässig.
Zur Bewertung des Kriteriums Ökonomie wird der ermittelte Arbeitsaufwand zur Erstellung der zu bewertenden Konstruktionen herangezogen. Auch hier wird eine starke Reduktion des Kriteriums vorgenommen. Jedoch gilt das zur Ökologie Gesagte: Die zu bewertenden Konstruktionen werden im Wesentlichen aus den gleichen Materialien bei ähnlichen Mengen hergestellt. Daher kann mit ähnlichen Materialkosten gerechnet werden.
Um die Vergleichbarkeit der lasttragenden und nicht lasttragenden Konstruktionen untereinander und miteinander weiter zu erhöhen, wird eine Auswahl aus den untersuchten Konstruktionen getroffen.
Bei dieser Auswahl handelt es sich jeweils um drei der am besten abschneidenden Konstruktionen in der jeweiligen Gruppe (lasttragend und nicht lasttragend).
Bei den nicht lasttragenden Konstruktionen wurde das fugenorientierte ballenbündige Skelett mit einer 70 cm starken Dämmung aus stehenden Quaderballen (Fo bb 70), das mit stehenden Ballen ausgefüllte Rahmensystem mit 36 cm Dämmstoffdicke (Rahmen 36 s) und das mit hochkant liegenden HD-Ballen gedämmte Scheibentragwerk (Scheibe 36 hl) gewählt.
Bei den lasttragenden Konstruktionen wurde das Tonnengewölbe mit 36 cm Dämmstoffdicke (Gewölbe 36), das System E^+, ebenfalls mit 36 cm Dämmstoffdicke (E^+ 36), gewählt.

Zusätzlich wird ein System eingeführt, das bisher noch nicht dargestellt wurde. Während bei dem System E^+ eine Vorspannung in solcher Höhe aufgebracht wird, dass es in der Nutzungsphase nicht zum Kriechen kommen kann, verzichtet das neue System bewusst auf diesen Anspruch und lässt ein Kriechen zu. Diese Maßnahme bringt den Vorteil einer geringeren Vorspannung, die leichter aufzubringen ist. Außerdem wird durch die geringere Vorspannung Material im Bereich der oberen und unteren Lasteinleitungsplatte eingespart. Das neue System ähnelt von seinem Aufbau her dem System Stroh unlimited, jedoch werden hochkant liegende HD-Ballen verwendet und zu deren Stabilisierung eine horizontale Bohle eingesetzt. Dieses neue System wird als lasttragendes kriechtolerantes System (Lt K 36) bezeichnet.

Abbildung 10.1 stellt den Arbeitsaufwand und die E_{50}-Werte der zu diskutierenden Konstruktionen dar. Den mit Abstand niedrigsten E_{50}-Wert weist das fugenorientierte ballenbündige Skelett auf. Bei dem Kriterium Arbeitsaufwand liegt diese Konstruktion an zweiter Stelle. An erster Stelle bezüglich des Arbeitsaufwandes liegt das Scheibentragwerk, welches bezüglich des E_{50}-Wertes an zweiter Stelle liegt. Der Arbeitsaufwand zur Erstellung des Rahmensystems liegt zwar über dem des Gewölbes, jedoch unter dem der Systeme E^+ 36 und Lt K 36. Der E_{50}-Wert ist aufgrund der Wärmebrückenwirkung des Holzes beim Rahmensystem am höchsten. Bei den lasttragenden Systemen schneidet das Gewölbe am besten ab. Jedoch liegt es sowohl hinsichtlich des Arbeitsaufwandes als auch des Energiebedarfes über 50 Jahre hinter den zwei besseren nicht lasttragenden Konstruktionen. Der höchste Arbeitsaufwand ist zur Erstellung des Systems E^+ nötig. Demgegenüber konnte der Arbeitsaufwand des neu eingeführten Systems Lt K 36 gesenkt werden, trotzdem ist zu dessen Erstellung der zweithöchste Arbeitsaufwand nötig. Hinsichtlich des Energiebedarfes über 50 Jahre belegen die beiden lasttragenden Wände die vorletzten Plätze.

Aufgrund der dargestellten Ergebnisse kommt der Verfasser dieser Dissertation zu dem Schluss, dass entgegen der Annahme in der Einleitung lasttragende Strohballenbausysteme nicht lasttragenden Strohballenbausystemen unter den in Deutschland gegebenen Bedingungen weder ökonomisch noch ökologisch überlegen sind.

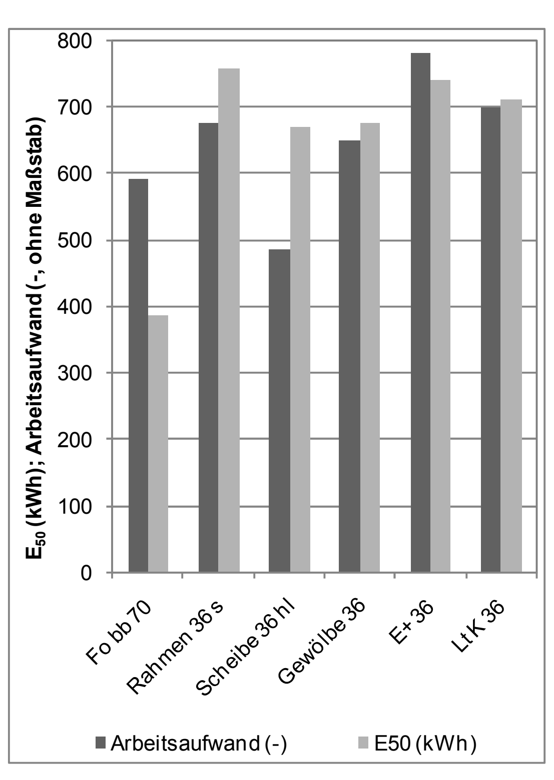


Abbildung 10.1: Arbeitsaufwand (qualitativ) und E_{50}-Werte der diskutierten Konstruktionen

Eine gewisse ökonomisch-ökologische Überlegenheit könnte lasttragenden Konstruktionen in Hinblick auf den Holzbedarf zugesprochen werden. Für das lasttragende Tonnengewölbe ist das richtig. Es hat mit 15 kg/m² den geringsten Holzbedarf. Das fugenorientierte ballenbündige Skelett und das kriechtolerante lasttragende System weisen den gleichen Holzbedarf von 24 kg/m² auf. Deutlich darüber liegt mit 33 kg/m² das System E^+. Das Rahmensystem hat einen Holzbedarf von 38 kg/m². Aufgrund der massiven Holzscheibe verbucht das Scheibentragwerk mit 57 kg/m³ den höchsten Holzbedarf. Die genannten Werte verstehen sich inklusiv eins Holzbedarfs von 13,4 kg/m² für die Stülpschalung. Aus Abbildung 10.2 ist ersichtlich, dass die Behauptung, lasttragende Strohballenkonstruktionen hätten einen geringeren Holzbedarf, in dieser generalisierten Form nicht aufrecht erhalten werden kann. Allerdings stimmt die Aussage in der Tendenz. Ebenso ließe sich argumentieren, lasttragende Konstruktionen hätten einen geringeren Stahlbedarf als nicht lasttragende Strohballenkonstruktionen. Auch diese Behauptung kann nach Abbildung 10.2 nicht aufrecht erhalten werden.

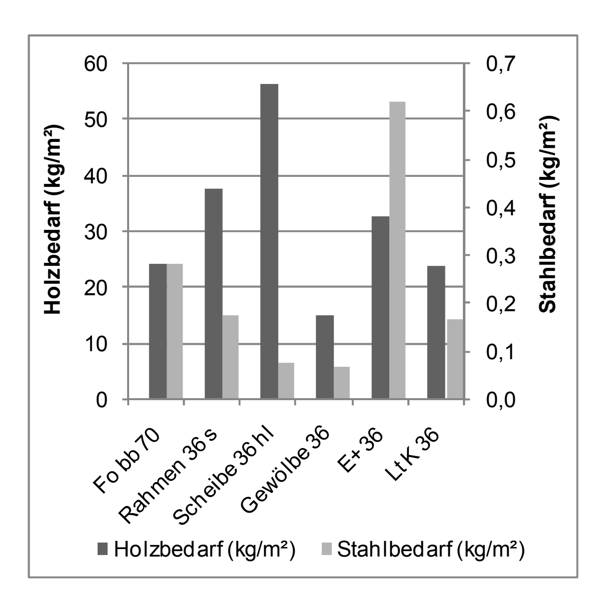


Abbildung 10.2: Holz- und Stahlbedarf der diskutierten Konstruktionen

Gewölbekonstruktion und Scheibentragwerk haben einen ähnlichen Stahlbedarf von 70 bzw. 80 g/m² Wandfläche. Gleich ist der Stahlbedarf der Rahmenkonstruktion und des kriechtoleranten lasttragenden Systems (Lt K 36) mit jeweils 170 g/m² Wandfläche. Da beim fugenorientierten ballenbündigen Skelett die Pfette mit Schlossschrauben an den Stützen angebracht wird, liegt der Stahlbedarf hier relativ hoch bei 280 g/m² Wandfläche. Der mit Abstand höchste Stahlbedarf von 620 g/m² Wandfläche wurde für das System E^+ ermittelt. Bei diesem System werden einerseits viele Schrauben zur Herstellung der U-Profile, Leiterrahmen und Kastenträger benötigt, andererseits wird die Vorspannung durch Windrispenbänder aufrecht erhalten, die den oberen und unteren Kastenträger verbinden.

Unter der Berücksichtigung der oben getroffenen Feststellungen und der Tatsache, dass eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für lasttragende Gebäude in Deutschland nach der Einschätzung des Verfassers innerhalb der nächsten Jahre auch mit erheblichem Forschungsaufwand nicht zu erwarten ist, liegt es nahe, zunächst auf eine Erweiterung der bauaufsichtlichen Zulassung für nicht lasttragende Strohballenkonstruktionen hinzuarbeiten, um im größeren Umfang Strohballenkonstruktionen realisieren zu können.
Nach Ansicht des Verfassers ist es wichtig, in möglichst kurzer Zeit möglichst viele Strohballenkonstruktionen zu errichten und damit dem Strohballenbau zu Publizität und einem breiten Durchbruch zu verhelfen. So kann das in der Einleitung dieser Dissertation formulierte Ziel, einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten am effektivsten umgesetzt werden.

Verzeichnis der Abkürzungen, Begriffe, Einheiten und Formelzeichen

(A): Abkürzung; (B): Begriff; (E): Einheit; (F): Formelzeichen

Zahl

2-string-bale (B) Englische Bezeichnung für Hochdruckkleinballen

3-string-bale (B) In den USA verbreitete Strohballen mit drei Bindungen

A

A (F) Fläche (m², mm²)

A_0 (F) Querschnittsfläche in unbelastetem Zustand (m², mm²)

Abscheidetrommel (B) Bauteil eines Mähdreschers, das der Separierung des Korns dient.

AbZ (A) Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung

AM (F) Arithmetisches Mittel

A_N (F) Gebäudenutzfläche nach EnEV (m²)

Außenskelett (B) Skelettbausystem, bei dem die Stützen vor der Wand liegen

Außensk. (A) Außenskelett

a_W (F) Wasseraktivität (-)

Axialdreschwerk (B) Längs zur Fahrrichtung eines Mähdreschers angeordnetes Bauteil, welches der Separierung des Korns dient und die Struktur von Strohhalmen stark schädigt.

B

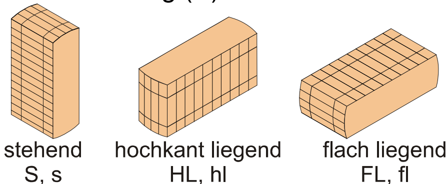
b (F) Breite eines Probekörpers (m, cm, mm)

b_0 (F) Ausgangsbreite eines Probekörpers (m, cm, mm)

Ballenbündiges Skelett (B) Skelettbausystem, bei dem die Stützen ballenbündig in der Strohballenwand liegen

Ballennagel (B) Angspitzter Holz- oder Bambusstab zum Verbinden von Strohballen

Ballenorientierung (B)





Bb Skelett (A) Ballenbündiges Skelett

Bestimmtheitsmaß (B) ein Maß der Statistik für den Anteil der erklärten Varianz eines Zusammenhangs (R^2)

BET-Theorie (B) Theorie zur Erklärung und Berechnung von Sorptionsvorgängen

C

c (F) Energie in der BET-Theorie, mit der die erste Wassermoleküllage an die (Innen-) Oberfläche eines Baustoffes gebunden ist (-)

c (F) Spezifische Wärmekapazität eines Stoffes (JK/kg)

C (F) Wärmespeicherfähigkeit eines Körpers (J/K)

California (A) Califorina Code

California Code (B) Kalifornische Strohballenbauregeln

California Code (B) Lasttragendes offenes Strohballenbausystem nach den Regeln des California Code

D

D (A) Direkte Belastung

Datenlogger (B) Mikroprozessorbasierende Baugruppe zur Datenaufzeichnung

Dichte (B) Physikalische Größe, die eine Masseverteilung beschreibt: Masse pro Volumen (m/V: kg/m³) (ρ)

Doppelskelett (B) Skelettbausystem, bei dem Stützen beidseitig vor der Wand stehen

Doppelsk. (A) Doppelskelett

Duktilität (B) Eigenschaft eines Werkstoffes sich bei Überbelastung stark zu verformen

E

E (F) Elastizitätsmodul (kN/m², N/mm²)

e (F) Eulersche Zahl (2,71828…) (-)

E-Modul (B) Siehe Elastizitätsmodul

E. (A) Einspannung

E^+ (A) System E^+

E_{50} (F) Summierter Energiebedarf über 50 Jahre (kWh/m²)

E_{FL} (F) E-Modul flach liegender Ballen

Eingespannte lasttragende Systeme (B) Lasttragende Strohballenbausysteme, bei denen die Querdehnung durch eine seitliche Einspannung verhindert wird

Einsp. (A) Einspannung

E_{HL} (F) E-Modul hochkant liegender Ballen

Elastizitätsmodul (B) Proportionalitätsfaktor. Entspricht der Steigung der Hook'schen Geraden im Spannungs-Stauchungsdiagramm (kN/m², N/mm²)

EnEV (A) Energieeinsparverordnung

e_P (F) Anlagenaufwandszahl (Primärenergiefaktor)

F

F (F) Kraft (N, kN)

F_{10} (F) Druckkraft senkrecht zur Querschnittsfäche bei 10% Stauchung (kN)

F_a (F) Kraft am Beginn des linearelastischen Bereiches (untere Proportionalitätsgrenze) (kN)

F_B (F) Bruchkraft (N)

F_e (F) Kraft am Ende des linearelastischen Bereiches (obere Proportionalitätsgrenze) (kN)

FL, fl (A) Ballen flach liegend. Siehe Ballenorientierung

Fo bb Skelett (A) Fugenorientiertes ballenbündiges Skelett

F_P (F) Verformungsnullpunkt (m)

Fugenorientiertes ballenbündiges Skelett (B) Skelettbausystem, bei dem die Stützen ballenbündig im Fugenraster der Ballen in der Strohballenwand verlaufen

G

g (E) Grundeinheit der Masse (Gramm) (1g = 0,001 kg = $1*10^{-6}$ Mg)

Gagné (A) System Gagné

GJ (E) Gigajoule (1 GJ = $1*10^9$ Joule)

Gleichgewichtsfeuchte (B) Derjenige Feuchtegehalt, der sich nach längerer Lagerung unter konstanten klimatischen Bedingungen (rH, T) in einem Bauteil einstellt

Großballen (B) Siehe Quaderballen

H

h (F) Höhe eines Probekörpers (m, cm, mm)

h_0 (F) Ausgangshöhe eines Probekörpers (m, cm, mm)

h (E) Stunde (1 h = 60 min = 3600 s)

ha (E) Hektar (1 ha = $10*10^3$ m² = 0,01 km²)

h_a (F) Höhe eines Prüfkörpers bei F_a (m)

h_e (F) Höhe eines Prüfkörpers bei F_e (m)

HD-Ballen (A) Siehe Hochdruck-Kleinballen

HD-Ballen Kombiprüfstand (B) Ein im Rahmen dieser Dissertation entwickelter Prüfstand für Spannungs-Stauchungs-, Relaxations- und Kriechtests an HD-Ballen

HL, hl (A) Ballen hochkant liegend. Siehe Ballenorientierung

Hochdruckballen (A) Siehe Hochdruck-Kleinballen

Hochdruck-Kleinballen (B) Mit einer Hochdruck-Kleinballenpresse produzierter, 2-fach gebundener Strohballen. Übliche Abmessungen: 0,48x0,36x100 cm

Hochdruck-Kleinballenpresse (B) Landwirtschaftliche Maschine zur Herstellung von Hochdruck-Kleinballen

Hook'sches Gesetz (B) Drückt den Zusammenhang zwischen Spannung und Stauchung im linearelastischen Bereich eines Werkstoffes aus ($\sigma = E * \varepsilon$

Horizontalausstifung (B) Stabilisiert Gebäude gegen horizontal angreifende Kräfte, z.B. Wind.

h_S (F) Höhe eines Probekörpers unmittelbar nach dem Aufbringen einer Last (m, cm, mm)

Hybird-dreschwerk (B) Bauteil eines Mähdreschers, das der Separierung des Korns dient, eine Kombination aus Axial- und Tangentialdreschwerk darstellt und die Struktur von Strohhalmen stark schädigt.

Hybride Systeme (B) Strohballenbausysteme, bei dem sowohl Strohballen als auch additive Tragelemente statische Funktionen übernehmen

hygroskopisches Verhalten (B) Die Eigenschaften eines Stoffes Wasser aus der Luft aufzunehmen und abzugeben

I

I (A) Indirekte Belastung

Innenskelett (B) Skelettbausystem, bei dem die Stützen innerhalb der Strohballenwand liegen

Innensk. (A) Innenskelett

J

J Abgeleitete Einheit der Energie, Arbeit und Wärmemenge (Joule) (1 J = 1 Nm = 1 Ws)

Jahresheizwärmebedarf Q_h (B) Nach EnEV. ($Q_h = 66 * (H_T+H_V) – 0,95 * (Q_S+Q_i)$) (kWh)

Jahresheizwärmebedarf Q_h" (B) Flächenbezogener Jahresheizwärmebedarf nach EnEV. (Q_h" = Q_h/A_N) (kWh/m²)

Jahrestransmissionswärmebedarf Q_T (B) Wärmeenergie, die in Anlehnung an die EnEV in Jahresfrist durch einen Quadratmeter Wandfläche transportiert wird (kWh/m²*a)

Jumbo Bale (B) Englische Bezeichnung für Quaderballen

K

K (E) Grundeinheit der Temperatur (Kelvin)

K (F) Kolbenhub (-)

kg (E) Kilogramm (1 kg = 1000g = 0,001 Mg)

Kleinballen (B) Siehe Hochdruck-Kleinballen

Kleinballenpresse (B) Siehe Hochdruck-Kleinballenpresse

Knoter (B) Bauteil in Strohballenpressen, welches Strohballen mit Ballengarn abbindet

Kolben (B) Bauteil, das in Strohballenpressen das Stroh im Presskanal komprimiert

Kombitest (B) Test, in dem zunächst das Spannungs-Stauchungsverhalten und im Anschluss das Relaxationsverhalten eines Probekörpers untersucht wird.

km (E) Kilometer (1 km = 1000 m)

kN (E) Kilonewton (1 kN = 1000 N ≈ 98,1 kg)

K_S (F) Kolbenhübe pro Schwad (-)

kW (E) Kilowatt (1 kW = 1000 W)

kWh (E) Kilowattstunden (1 kWh = $3,6*10^6$ Ws = 3,6 MJ)

L

L, l (F) Länge eines Probekörpers (m, cm, mm)

L_0, l_0 (F) Ausgangslänge eines Probekörpers (m, cm, mm)

ΔL (F) Längenänderung (m, cm, mm)

Lasttragende Systeme (B) Strohballenbauweise, bei der die Strohballen statische Funktionen übernehmen

Lasttragendes kriechtolerantes System (B) Eingespanntes lasttragendes System, bei dem eine Kriechverformung über die Nutzungsdauer zugelassen wird

Lt K (A) Lasttragendes kriechtolerantes System

LüWRG (A) Lüftungswärmerückgewinnung

M

m (F) Poission-Zahl (-)

m (F) Masse (eines feuchten Körpers) (g, kg)

m (E) Grundeinheit der Länge (Meter) (1 m =100 cm = 1000 mm)

m. (A) Mit

m_0, m_{tr} (E) Masse eines trockenen Körpers (g, kg)

max (A) Maximum

m_B (F) Masse eines Strohballens (kg)

mE (A) Mit Einspannung

min (E) Minute (1 min = 60 s = 1/60 h)

min (A) Minimum

Mg (E) Megagramm (1 Mg = 1000 kg = 1t)

MJ (E) Megajoule (1 MJ = $1*10^6$ J = 278 kWh)

m_K (F) Pro Kolbenstoß verdichtete Masse (kg)

mm (E) Millimeter (1 mm = 0,1 cm = 0,001 m)

m_S (F) Strohmasse eines Schwades (kg)

N

n (F) Mittlere Anzahl der Wassermoleküllagen auf der (Innen-) Oberfläche von Bauteilen in der BET-Theorie (-)

N (E) Grundeinheit der Kraft (Newton) (1 N = 0,001 kN ≈ 0,0981 kg)

Nicht lasttragende Systeme (B) Strohballenbauweise, bei der nicht die Strohballen sondern additive Tragelemente die statische Funktion übernehmen

O

o. (A) Ohne

oE (A) Ohne Einspannung

Offene Systeme (B) Nicht eingespannte lasttragende Strohballenbausysteme

P

PEI (A) Siehe Primärenergieinhalt

Pickup (B) Maschinenteil, das bei Strohballenpressen der Aufnahme des Strohs vom Feld dient

Primärenergieinhalt (B) Der Anteil nicht erneuerbarer Energie, der benötigt wird, um einen (Bau-) Stoff bzw. ein (Bau-) Produkt oder eine Konstruktion herzustellen (kWh/Mg, kWh/m³)

Presskanal (B) Der Teil von Strohballenpressen, in dem das Stroh durch den Kolben komprimiert wird

Q

Q (F) Wärmemenge (J)

Q-Ballen (A) Siehe Quaderballen

Q-Ballen Kombiprüfstand (B) Ein im Rahmen dieser Dissertation entwickelter Prüfstand für Spannungs-Stauchungs- und Relaxationstests Q-Ballen

Q_h (F) Jahresheizwärmebedarf nach dem vereinfachten Verfahren der EnEV (kWh)

Q_h" (F) Flächenbezogener Jahresheizwärmebedarf nach dem vereinfachten Verfahren der EnEV (kWh/m²)

Q_T (F) Jahrestransmissionswärmebedarf (kWh/m²*a)

Querförderer (B) Bauteil, welches in Hochdruck-Kleinballenpressen das Stroh von der Pickup zum Raffer befördert

Quaderballen (B) Großformatige von Quaderballenpressen hergestellte Strohballen mit 4-6 Garnbindungen und Abmessungen von bis zu 1,2x1,3x3m

Quaderballenpresse (B) Landwirtschaftliche Maschine zur Herstellung von Quaderballen

R

R (F) Wärmedurchlasswiderstand ($R = d / \lambda$)

R^2 (F) Bestimmtheitsmaß

Raffer (B) Bauteil, welches in Hochdruck-Kleinballenpressen das Stroh vom Querförderer in den Presskanal einbringt

Rahmensysteme (B) Nicht lasttragende Strohballensysteme deren Tragstruktur auf die Ballenabmessungen abgestimmt ist. Die Stützen sind dabei in der Regel wandbreit. Rahmensysteme werden in der Regel mit hochkant liegenden oder stehenden Ballen verfüllt.

Rahmen (A) Rahmensystem

rH (F) Relative Luftfeuchte (relative humidity) (%, -)

R_{Se} (F) Äußerer Wärmeübergangswiderstand (m²K/W)

R_{Si} (F) Innerer Wärmeübergangswiderstand (m²K/W)

R'_T (F) Oberer Grenzwert des Wärmedurchgangswiderstandes (m²K/W)

R''_T (F) Unterer Grenzwert des Wärmedurchgangswiderstandes (m²K/W)

R_T (F) Wärmedurchgangswiderstand ($R_T = R_{Si} + \Sigma_R + R_{Se}$) (m²K/W)

S

s (E) Grundeinheit der Zeit (Sekunde) (1 s = 1/60 min = 1/3600 h)

S, s (A) Ballen stehend. Siehe Ballenorientierung

Scheibentragwerke (B) Nicht lasttragende Strohballenbausysteme, bei denen Strohballen als Wärmedämmung vor einer tragenden Scheibe angeordnet werden.

Scheibe (A) Scheibentragwerke

Schwad (B) Strohhügel, der vom Mähdrescher erzeugt und von der Strohballenpresse aufgenommen wird.

Seitliche Einspannung (B) Vorrichtung die die Querdehnung von Strohballen bzw. Strohballenwänden infolge einer Vertikalstauchung verhindert bzw. reduziert.

Sorptionsisotherme (B) Beschreibt die Gleichgewichtsfeuchte eines Stoffes bei gleicher Temperatur in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit

Sprödigkeit (B) Baustoffe sind spröde, wenn sie wenig elastisch sind und zu einem Bruch nach geringer Verformung neigen

SPS (A) Speicherprogrammierbare Steuerung: Mikrocontrollerbasierende Baugruppe zur Steuerung von Maschinen und Anlagen

Standardabweichung (B) Maß für die Streuung von Argumenten um deren Mittelwert

Stroh unlimited (B) Strohballenbau Firma, Berlin

Stroh unlimited (A) System Stroh unlimited

Strohballen (B) Gepresstes und 2- oder mehrfach zu Ballen gebundenes Stroh. Siehe Hochdruck-Kleinballen und Quaderballen

Strohballenpresse (B) Siehe Hochdruck-Kleinballenpresse und Quaderballenpresse

Summierter Energiebedarf über 50 Jahre (B) die Summe des Jahrestransmissionswär-

mebedarfes über 50 Jahre multipliziert mit einem Primärenergiefaktor plus dem Primärenergieinhalt (E_{50} = PEI + 50 * Q_T * e_P) (kWh/m²)

S_X (F) Standardabweichung (%)

S_x (F) Standardabweichung

System E^+ (B) Lasttragendes eingespanntes Strohballenbausystem, bei dem die seitliche Einspannung über U-Profile realisiert, die Knickgefahr durch horizontale Elemente reduziert wird

System Gagné (B) Nicht lasttragendes Strohballenbausystem, bei dem die Strohballen mit dicken Mörtelfugen ohne Verband zu einer Wand aufgeschichtet werden

System Stroh unlimited (B) Lasttragendes seitlich eingespanntes Strohballenbausystem, bei dem die seitliche Einspannung über Kanthölzer realisiert wird

T

t (E) Tonne (1 t = 1 Mg = 1000 kg)

t (F) Zeit (s, min, h, Tage)

T (F) Temperatur (Kelvin)

Tangentialdreschwerk (B) Quer zur Fahrrichtung eines Mähdreschers angeordnetes Bauteil, welches der Separierung des Korns dient und die Strohstruktur vergleichsweise wenig schädigt.

Tonnengewölbe (B) Lasttragendes Strohballenbausystem, bei dem ein Gewölbe aus konisch geschnittenen Strohballen errichtet wird

Trockendichte ρ_{tr} (B) Rohdichte ρ abzüglich des Feuchtegehaltes u

t_S (F) Für das Pressen eines Schwades benötigte Zeit (min)

U

u (F) Massebezogener Feuchtegehalt nach DIN EN ISO 12571: 2000 (g/g)

U (F) Wärmedurchgangskoeffizient (W/(m²K))

u_m (F) Wassergehalt bei monomolekularer Belegung der Bauteiloberfläche bei der BET-Theorie (g/g)

V

V (F) Volumen (m³)

V (A) Verputzt

V_e (F) Bruttovolumen nach EnEV

W

W (E) Grundeinheit der Leistung (Watt)

Wärmedurchlasswiderstand R (B) Quotient aus der Dicke d und der Wärmeleitfähigkeit λ einer Bauteilschicht (m²K/W)

Wärmedurchgangswiderstand R_T (B) Gesamtwärmedurchlasswiderstand einer Konstruktion (m²K/W)

Winkelverzerrung (B) Ein- oder mehrachsige Verformung eines Bauteils unter Belastung

Wt (A) Wandtest

X

X (F) Verformung (Höhenänderung) eines Probekörpers (m, mm)

X_{40} (F) Verformung (Höhenänderung) eines Probekörpers bei einer Spannung von 40 kN/m² (m, mm)

X_K (F) Verformung (Höhenänderung) eines Probekörpers durch Kriechen (m, mm)

X_e (F) Verformung bei F_e (m) (gemessen ab F_P)

Epsilon

ε (F) Stauchung (%, -)

ε_{40} (F) Stauchung bei einer Spannung von 40 kN/m² (%)

ε_{40BFL} (F) Stauchung flach liegender HD-Ballen bei einer Spannung von 40 kN/m² (%)

ε_{40WFL} (F) Stauchung einer Wand aus flach liegenden HD-Ballen bei einer Spannung von 40 kN/m² (%)

ε_{40BHL} (F) Stauchung hochkant liegender HD-Ballen bei einer Spannung von 40 kN/m² (%)

ε_{40WHL} (F) Stauchung einer Wand aus hochkant liegenden HD-Ballen bei einer Spannung von 40 kN/m² (%)

ε_a (F) Stauchung bei σ_a (%)

ε_e (F) Stauchung bei σ_e (%)

ε_{FL} (F) Stauchung flach liegender Ballen (%)

ε_G (F) Gesamtstauchung (%)

ε_{G20} (F) Gesamtstauchung nach 20 Tagen (%)

ε_{HL} (F) Stauchung hochkant liegender Ballen (%)

ε_K (F) Kriechstauchung (%)

ε_{K20} (F) Kriechstauchung nach 20 Tagen (%)

ε_l (F) Längsstauchung

ε_p (F) Nullpunktverschiebung (%)

ε_{pFL} (F) Nullpunktverschiebung flach liegender Ballen (%)

ε_{pHL} (F) Nullpunktverschiebung hochkant liegender Ballen (%)

ε_q (F) Querdehnung

ε_{QHL} (F) Stauchung hochkant liegender Q-Ballen (%)

ε_V (F) Vorkomprimierung (m)

Teta

θ (F) Temperatur (°C)

θ_{ref} (F) Referenztemperatur (°C)

Lambda

λ (F) Wärmeleitfähigkeit (W/(mK))

My

μ (F) Querkontraktionszahl (-)

Rho

ρ (F) Dichte (kg/m³)

ρ_{tr} (F) Trockendichte (kg/m³)

Sigma

σ (F) Druckspannung (kN/m²)

σ_{10} (F) Druckspannung bei 10% Stauchung (kN/m²)

σ_a (F) Druckspannung am Anfang des Proportionalbereiches (kN/m²)

σ_{dB} (F) Bruchspannung (N/mm²)

σ_e (F) Druckspannung am Ende des Proportionalbereiches (kN/m²)

σ_{hFL} (F) Horizontalspannung bei Wänden aus flach liegenden HD-Ballen (kN/m²)

σ_{hHL} (F) Horizontalspannung bei Wänden aus hochkant liegenden HD-Ballen (kN/m²)

σ_{max} (F) Maximalspannung (kN/m²)

σ_S (F) Startdruckspannung ((kN/m²)

σ_R (F) Restspannung (%)

σ_r (F) Restdruckspannung (kN/m²)

σ_{R24} (F) Restspannung nach 24 h (%)

σ_{R24BFL} (F) Restspannung flach liegender Ballen 24 h (%)

σ_{R24BHL} (F) Restspannung hochkant liegender Ballen nach 24 h (%)

σ_{R24FLK} (F) Restspannung flach liegender Ballen im Kombitest nach 24 h (%)

σ_{R24HLK} (F) Restspannung hochkant liegender Ballen im Kombitest nach 24 h (%)

σ_{R24HLL} (F) Restspannung hochkant liegender Ballen im Langzeittest nach 24 h (%)

σ_{R24WFL} (F) Restspannung einer Wand aus flach liegenden Ballen nach 24 h (%)

σ_{R24WHL} (F) Restspannung einer Wand aus hochkant liegenden Ballen nach 24 h (%)

σ_{R120} (F) Restspannung nach 120 h (5 Tage) (%)

σ_{R480} (F) Restspannung nach 480 h (20 Tage) (%)

σ_{R2000} (F) Restspannung nach 2000 h (ca. 83 Tage) (%)

σ_V (F) Vorspannung (kN/m²)

σ_{vFL} (F) Vertikalspannung bei Wänden aus flach liegenden HD-Ballen (kN/m²)

σ_{vHL} (F) Vertikalspannung bei Wänden aus hochkant liegenden HD-Ballen (kN/m²)

σ_X (F) Relaxation (%)

Phi

φ (F) Relative Luftfeuchte (-, %)

Sonderzeichen

- (E) dimensionslos

Ø (F) Arithmetisches Mittel der entsprechenden Argumente

°C (E) Grad Celsius

Verzeichnis der Quellen

Acton, R. U., Zitiert in Stone 2003, Building Green 2007 (1995): Tests zum thermisch Verhalten von Strohballen. Sandia National Laboratories, USA.

Ashour, Taha (2003): The use of renewable agricultural by-products as building materials. Zagazing Universität Benha Branch Kairo: Dissertation.

Aufhammer, G.; Fischbeck, G. (1973): Getreide, Produktionstechnik und Verwertung. DLG Verlags GmbH Frankfurt/Main.

Bauer, Georg (2003): Faszination Landtechnik - 100 Jahre Landtechnik- Firmen und Fabrikate im Wandel. DLG Verlags GmbH Frankfurt/Main.

Becker, M.; Nehring, K. (Hrsg) (1965): Handbuch der Futtermittelkunde, Band 2. Verlag Paul Parey, Hamburg/Berlin.

Bigland-Pritchard, M.; Pitts, A. (2006): Evaluation of strawbale buildung, benefits and risks. In: Architectural Science Review, Vol 49, No 4, pp372-384, December 2006. Faculty of Architecture, Design and Planning, The University of Sydney, Sydney, NSW, Australia.

Bou-Ali, Ghailene (1993): Straw bales and Straw bale wall systems. The University of Arizona.

Brockhaus GmbH (Hrsg) (1988): Brockhaus-Enzyklopädie 19. Auflage, Band 5 Cot-Dr. Fa. Brockaus GmbH, Mannheim.

Brockhaus GmbH (Hrsg) (1989): Brockhaus-Enzyklopädie 19. Auflage, Band 8 Fru-Gos. Fa. Brockaus GmbH, Mannheim.

Brockhaus GmbH (Hrsg) (1989) a: Brockhaus-Enzyklopädie 19. Auflage, Band 9 Got-Hero. Fa. Brockaus GmbH, Mannheim.

Brockhaus GmbH (Hrsg) (1992): Brockhaus-Enzyklopädie 19. Auflage, Band 18 Rad-Rüs. Fa. Brockaus GmbH, Mannheim.

Brockhaus GmbH (Hrsg) (1994): Brockhaus-Enzyklopädie 19. Auflage, Band 23 Us-Wej. Fa. Brockaus GmbH, Mannheim.

Büeremann, Martin (1999): Mähdrescheruntersuchungen, Einflüsse auf die Kornabscheidung der Wendetrommel nachgeschalteter Abscheidetrommeln. In: LANDTECHNIK 1/1999. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt.

City of Austin, Texas/USA (): Austin Straw-Bale Code (Texas/USA).

City of Boulder (1981): City of Boulder Straw Bale Code.

City of Cortez (1994): City of Cortez Straw Bale Code (Odrinance No. 851, Series 1997: Load Bearing & Non Loadbearing combined prescriptive standarts for Straw Bale Constructions. .

CLAAS KGAa mbH (Hrsg.) (2003): CLAAS QUADRANT 1150. Claas Vertriebsgesellschaft mbH, Harsewinkel.

CLAAS KGAa mbH (Hrsg.) (2003) a: Bedienungsanleitung CLAAS QUADRANT 1150. Claas Vertriebsgesellschaft mbH, Harsewinkel.

CLAAS KGAa mbH (Hrsg.) (2004): CLAAS QUADRANT 2200, 2100. Claas Vertriebsgesellschaft mbH, Harsewinkel.

CLAAS KGAa mbH (Hrsg.) (2004) a: CLAAS Produktberater QUADRANT. Claas Vertriebsgesellschaft mbH, Harsewinkel.

CLAAS KGAa mbH (Hrsg.) (2006): CLAAS MEDION 310, Flexibilität ist Trumpf. Claas Vertriebsgesellschaft mbH, Harsewinkel.

CLAAS KGAa mbH (Hrsg.) (2006) a: CLAAS MEGA 360 / 350, Das Ergebnis zählt. Claas Vertriebsgesellschaft mbH, Harsewinkel.

CLAAS KGAa mbH (Hrsg.) (2006) b: CLAAS LEXION 580 570 570 C, Produktivität zählt. Claas Vertriebsgesellschaft mbH, Harsewinkel.

CLAAS KGAa mbH (Hrsg.) (2006) c: CLAAS LEXION 600, Die Definition einer neuen Klasse. Claas Vertriebsgesellschaft mbH, Harsewinkel.

CLAAS KGAa mbH (Hrsg.) (2006) d: CLAAS LEXION 3400, Die Rechnung stimmt. Claas Vertriebsgesellschaft mbH, Harsewinkel.

CLAAS KGAa mbH (Hrsg.) (2006) e: CLAAS CELTIS 456, 446, 436, 426, Auf den ist Verlass. Jeden Tag.. Claas Vertriebsgesellschaft mbH, Harsewinkel.

CLAAS KGAa mbH (Hrsg.) (2006) f: CLAAS AXION 850, 840, 830, 820, 810, Es gelten neue Regeln.. Claas Vertriebsgesellschaft mbH, Harsewinkel.

Czok, H. (2005): Persönliche Mitteilung. Czock ist Product Manager bei der Firma Welger, Wolfenbüttel.

Danielewicz, I.; Reinschmidt, J. (2007): Lastversuche mit großen Quaderballen an der Hochschule Magdeburg-Standal V. 2a. Unveröffentlichter Forschungsbericht.

DIBt 2006 - Deutsches Institut für Bautechnik (2006): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-23.11-1595 Wärmedämmstoff aus Strohballen "Baustrohballen". Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin.

DIN EN ISO 12571 (2000): Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten, Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften. Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.Deutsches Institut für Bautechnik, Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin.

DIN EN ISO 1602 (1997): Wärmedämmstoffe für das Bauwesen, Bestimmung der Rohdichte. Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin.

DIN EN ISO 822 (1994): Wärmedämmstoffe für das Bauwesen, Bestimmung der Länge und Breite. Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin.

DIN EN ISO 826 (1996): Wärmedämmstoffe für das Bauwesen, Bestimmung der Verhaltens bei Druckbeanspruchung. Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin.

Eternit GmbH (Hrsg.) (2006): Eternit Wellplatten. Eternit AG Heidelberg.

Eyerer, Peter; Reinhardt, Hans-Wolf (2000): Ökologische Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden. Birkhäuser, Basel.

FASBA (2003): Test der Wärmeleitfähigkeit nach DIN 52612. FIW München.

Freemann (1995): Modell 200/300 Series Pull Type Balers. J.A. Freemann Son Inc. Portland, Oregon, USA.

Fuchs, F.; Imhoff, B. (2007): Persönliche Mitteilung. Fuchs und Imhoff sind Architekten und Ingenieure und Inhaber der Firma Baustroh- unlimited, Berlin.

GEMIS (Version 4.2): Globales Emissionsmodell integrierter Systeme. Ökoinstitut Freiburg, Darmstadt, Berlin.

Grandsaert, M. F. (1999): A Compression Test of Plastered Straw-Bale Walls. University of Colorado at Boulder, USA.

Gruber, H. u. A. (2003): Bauen mit Stroh. Ökobuch Verlag Staufen, 2. Auflage.

Hansen, H.; Warmuth, E. u. A. (2004): Bau-Strohballen aus der Landwirtschaft. Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V., Lüneburg.

Hegger, Auch-Schwenk, Fuchs, Rosenkranz (2005): Baustoff Atlas. Birkhäuser Basel, Boston, Berlin.

Heinold, M. (2005): Persönliche Mitteilung. Heinold ist Mitarbeiter der F. John Deere im Bereich Strohballenpressen.

Heinold, M. (2005) a: Persönliche Mitteilung. Heinold ist Mitarbeiter der F. John Deere im Bereich Strohballenpressen.

AGCO Corporation (): Hesston Rectangular Balers. AGCO Corporation, Duluth, Goria, USA.

Jeroch, H.; Flachowsky, G.; Weißbach, F. (1993): Futtermittelkunde. Gustav Fischer Verlag, Jena.

John Deere (Hrsg.) (2003): Hochdruckpressen-Verkaufshandbuch. Deere & Compagnie Germany, Bruchsal.

King, Bruce (2003): Load-Bearing Straw Bale Constructions, A summary of worldwide testing and experience. Ecological Building Network (EBNet), USA.

King, Bruce (Hrsg.) (2006): Design of Straw Bale Buildings, The State of The Art. Green Building Press, San Rafael, CA, USA.

Klopfer, H. (2002): Kapitel III, Feuchte. In: Lutz, Jenisch, Klopfer, Freymuth, Krampf, Petzold: Lehrbuch der Bauphysik Schall-Wärme-Feuchte-Licht-Brand-Klima. B.G. Teuber Stuttgart, Leipzig, Wien 5. Auflage.

Köhler/Klingele (Hrsg.) (1995): Baustoffdaten – Ökoinventare. Ohne Verlag.

Kolb, Josef (1998): Systembau mit Holz. Baufachverlag AG Dietikon, Schweiz; 4. Auflage.

Maschinenfabrik Bernd Krone GmbH (Hrsg) (2003): Krone Großpackenpressen BiG Pack VFS 890,1270,1290,12130. Maschinenfabrik Bernd Krone GmbH, Spelle.

Maschinenfabrik Bernd Krone GmbH (Hrsg) (2004): Krone Händler-Nettopreisliste 1/2004, 2/2004. Maschinenfabrik Bernd Krone GmbH, Spelle.

Maschinenfabrik Bernd Krone GmbH (Hrsg) (2005): Großpackenpressen BiG PACK

Pressenprogramm 2006. Maschinenfabrik Bernd Krone GmbH, Spelle.

KTBL 2004 - Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (Hrsg) (2004): Betriebsplanung in der Landwirtschaft 2004/2005. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Darmstadt.

KTBL 2004a - Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (Hrsg) (2004): Betriebsplanung in der Landwirtschaft 2004/2005, CD. KTBL.

Kuchling, H. (2001): Taschenbuch der Physik, 17. Auflage. Fachbuchverlag Leipzig.

Kunze, R. F. (1987): Lexikon der Landtechnik, Getreide- und Halmfruchternte. Vogel-Fachbuchverlag, Würzburg.

Leible, L., Arlt, A. Fürniß, B., Kälber, S. Kappler, G., Lange, S., Nieke, E., Rösch, C., Wintzer, D. (2003): Energie aus biogenen Rest- und Abfallstoffen: Bereitstellung und energetische Nutzung organischer Rest- und Abfallstoffe sowie Nebenprodukte als Einkommensalternative für die Land- und Forstwirtschaft - Möglichkeiten, Chancen und Ziele. Forschungszentrum Karlsruhe.

Land & Forst 35 (2005): Krone: Schlagkraft mit neuer BP 1290 HDP. Deutscher Landwirtschaftsverlag, Hannover.

Lohse, T. (2002): Lebensmittellagerung ohne Kühlung, Grundlagen und Qualitätskriterien, Modellierung und Simulation. Richard Pflaum Verlag GmbH Co. KG, München, Bad Kissingen. Berlin, Düsseldorf, Heidelberg.

Massey Ferguson (2007): MF 1800 Hochdruckpressen, Vielseitig und leistungsstark durch Center-Line Technologie. AGCO Limited, Duluth, Georgia, USA.

Mayor and City Council of Tucso, Arizona (1996): Tucso/Pima County Strawbale Code, Appendix Chapter 72 Straw-Bale Structures.

McCabe, J. (1994): The Thermal Resistivity of Straw Bales for Construction. Master Thesis.

Minke, Gernot (2000): Dächer begrünen, Einfach und wirkungsvoll. ÖkobuchVerlag Staufen.

Minke, Gernot (2001): Das neue Lehmbauhandbuch. Ökobuch Verlag Staufen, 5. Auflage.

Minke, Gernot; Mahlke, Friedemann (2004): Der Strohballenbau, Ein Konstruktionshandbuch. Ökobuch Verlag Staufen, 1. Auflage.

Murphy, D., Bockisch, F.J., Menuhr, A.S. (1999): Möglichkeiten und Chancen von heimischen nachwachsenden Rohstoffen zur Nutzung als Dämmmaterial. Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Landbauforschung Volkenrode, Sonderheft 203.

New Holland (2005): New Holland BB900 Square Baler. CNH America LLC.

ORNL (1998): Tests zum Wärmeleitverhalten von Strohballenwänden. Oak Ridge National Labs, USA.

Peperhowe, S. (2005): Persönliche Mitteilung. Peperhowe ist Productmanager der Firma Claas, Harsewinkel im Bereich Strohballenpressen.

Renzenbrink, Udo (1993): Die sieben Getreide. Philosophisch-Antrophosophischer Verlag am Goetheanum, Dornach/ Schweiz.

Dirk Scharmer (2007): Persönliche Mitteilung. Scharmer ist Geschäftsführender Vorsitzender des Fachverbandes Strohballenbau Deutschland e.V. (FASBA), Architekt und Strohballenbaupionier.

Schmidt, Werner (2003): Strohballendruckversuche. Atelier Werner Schmidt, Trun, Schweiz.

Schneider, Klaus-Jürgen (1998): Bautabellen für Architekten, 13. Auflage. Werner Verlag Düsseldorf.

Schneider, Klaus-Jürgen (2002): Bautabellen für Architekten, 15. Auflage. Werner Verlag Düsseldorf.

Schrader, Mila (1998): Reet und Stroh als historisches Baumaterial. Edition :andereit Verlag GmbH, Suderburg-Hösseringen.

Sedlbauer, Klaus (2001): Vorhersage von Schimmelpilzbilung auf und in Bauteilen. Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Stuttgart, Dissertation.

Sedlbauer, Klaus; Krus, Martin (2002) a: Schimmelpilz aus bauphysikalischer Sicht, Beurteilung durch aw-Werte oder Isoplethensysteme?. Tagungsbeitrag für die Tagung "Schimmelpilze im Wohnbereich" der TU München, 26. Juni 2002.

Segler (1956): Quelleninformationen nicht verfügbar

Sher, Richter, Woods, Johannessen (1995): California Straw Bale Code Ab 1314 Chapter 941. .

Smith, Dan (2003): Creep in Bale Walls. DAS Architects Berkeley.

Snel, H. (2004): Stroh im Kopf. Filmdokumentation, Heidi Snell Ökofilm. Belzig.

Sonnenberg, Hans (2002): Mechanische Aufbereitung von Einstreu-Material für die Tierhaltung zur Verbesserung der Qualität. Universität Kassel, FB Ökologische Agrarwissenschaften, FG Agrartechnik, Dissertation.

Stephens, Bundinger (2000): Laboratory Test. Stephens, Don amd Budinger & Associates, Inc. Spokane, Washington.

Stone, N. (1997): Thermische Untersuchungen an Strohballenwänden. Architectural Testing Labs (ATI), Fresno, California, USA.

Stone, N. (2003): Thermal Performance of Straw Bale Wall Systems. Ecological Building Network (EBNet), USA.

Strasburger, E.; Noll, F.; Schenk, H.; Schimper, A. Neu übearbeitet von Sitte, Ziegler, Ehrendorfer, Brensinski (2002): Lehrbuch der Botanik für Hochschulen, 35. Auflage. Spektrum, Akademischer Verlag, Heidelberg.

Struwe, Timo (2007): Elastomechanisches Verhalten von Strohballen. Diplomarbeit, FB11, Ökologische Agrarwisseschaften, Universität Kassel.

Thompsen, K; Watts, K.; Wilkie, K.; Corson, J. (1995): Thermal and Mechanical Properties of Straw Bales As They Related to a Straw House. Canadian Society of Agricultural Engineering; Paper No 95-209, Ottawa, Ontario.

Vardy, Stephen; MacDougall, Colin (2006): Compressive Testing and Analysis of Plastered Straw Bales, In Green Building Journal Vol. 1 No. 1 Winter 2006: 65-79. College Publishing, Kimball, MI, USA.

VDI 2006 - Verein deutscher Ingenieure (Hrsg) (2006): VDI Wärmeatlas, Ausgabe 2006. Springer- Verlag Berlin Heidelberg.

Vormann 1998 - August Vormann GmbH (Hrsg) (1998): Holzverbinder-Stützschuhe (Produktkatalog). August Vormann GmbH & Co., Ennepetal.

Waltjen, T. (Hrsg) (1999): Ökologischer Bauteilkatalog. SpringerWienNewYork.

Watts, K., Wilkie, K., Thompson, K., and Corson, J. (1995): Thermal and Mechanical Properties of Straw Bales As They Relate To a Straw House.. Canadian Society of Agricultural Engineering, Ottawa, Ontario, Canada.

Welger Maschinenfabrik GmbH (Hrsg) (1): Welger AP 530, AP 630, AP 730, AP 830 Aufsammelpressen. Welger Maschinenfabrik GmbH,Wolfenbüttel.

Welger Maschinenfabrik GmbH (Hrsg) (2): Welger D 4006,D 4060, D 6006, D 6060 Großballenpressen. Welger Maschinenfabrik GmbH,Wolfenbüttel.

Welger Maschinenfabrik GmbH (Hrsg) (1981): Betriebsanleitung AP 42 AP 48/53. Welger Maschinenfabrik GmbH,Wolfenbüttel.

Welger Vertriebs GmbH (Hrsg) (2005): Basispreisliste 2005. Welger Vertriebs GmbH, Wolfenbüttel.

Willems, W.M.; Schild, K.; Dinter, S. (2006): Vieweg Handbuch Bauphysik Teil 1, Wärme- und Feuchteschutz, Behaglichkeit, Lüftung. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, Wisbaden.

Wilmer, Hubert in: Profi - Magazin für professionelle Agrartechnik 10/2005 (2005): Ballen wie Briketts, Großpackenpresse Krone BiG Pack 1290 HDP. Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster.

Wimmer, R.; Hohensinner, H.; Janisch, L.; Drack, M. (2001): Wandsysteme aus nachwachsenden Rohstoffen. Wirtschaftsbezogene Grundlagenstudie. Endbericht, „Gruppe Angepasste Technologie“ (GrAT) an der Technischen Universität Wien im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie,.

Wimmer, R.; Hohensinner, H.; Drack, M. (2006): S-House, Innovative Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen am Beispiel eines Büro- und Ausstellungsgebäudes. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien/A.

Zhang, John Q. (2000): Load carrying characteristics of a single straw bale under compression. University of Western Sydney, Australia.

Anhänge

Anhang I.1: Beschreibung der Getreidearten

In diesem Anhang werden Eigenschaften und Zusammensetzung der für diese Arbeit relevanten Strohsorten in alphabetischer Reihenfolge dargestellt. Im Einzelnen sind dies:

- Gerste
- Hafer
- Reis
- Roggen
- Weizen/Dinkel
- Ferner: Ackerbohne, Hanf, Switchgras und Miscanthus

1 Gerste

Die Gerste (lat. Hordeum) gilt neben dem Weizen als das älteste Getreide. Sie ist sowohl in heißen Klimazonen (z.B. Arabien) als auch in gemäßigten oder kühlen Klimazonen (in Norwegen bis zum 70. Breitengrad) und sogar in hochalpinen Lagen über 4600 m üNN verbreitet und ist deutlich anspruchsloser als Weizen. Gerste wurde im Altertum in den Hochkulturen Mittel- und Westasiens, Ägyptens und Europas angebaut, wo sie in Griechenland eine hohe kultische Bedeutung erlangte.

Die Gerstenformen werden durch die Gliederung der Ährchen bestimmt, welche gleichzeitig angeordnet sind. Je nach Zahl der Anordnung werden 2,4, und 6 zeilige Gersten unterschieden.
Nach dem Aussaattermin wird Winter- und Sommergerste unterschieden.
Wintergerste wird in der zweiten Septemberhälfte gesät und Anfang Juli geerntet.
Sommergerste wird Anfang März gesät und Ende Juli bis Mitte August geerntet.
Die meisten Gerstesorten sind stark begrannt.
Wuchshöhe: 80-100 cm
Gerste wird in der Regel als Sommergetreide angebaut. (vgl. Brockhaus 1989: 378f, Renzenbrink 1993: 98ff, Aufhammer/Fischbeck 1973: 273ff). Die Unterschiede in der Zusammensetzung von Winter- und Sommergerste sind laut Becker/Nehring (1965: 46) gering.

Vorteile gegenüber der Sommergerste sind der kräftigere Halm und eine bessere Schädlingsresistenz.

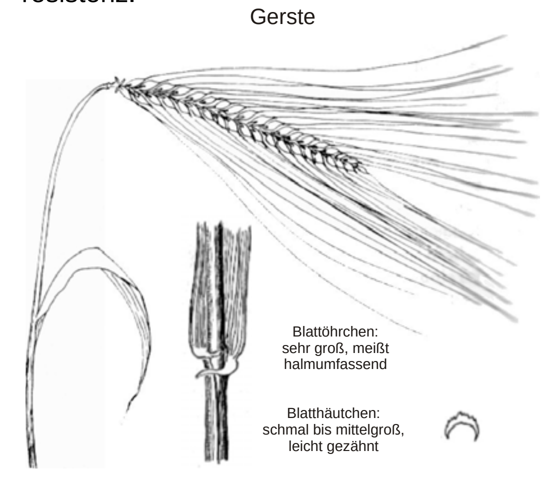


Abbildung 1.1: Gerste (verändert nach Renzenbrink 1993: 99, Aufhammer/Fischbeck 1973: 22)

Tabelle 1.1: Zusammensetzung von Gerstenstroh (Daten aus Becker/Nehring 1965: 46)

Strohart	TS	OS	RP	Rohfett	Rohfaser	NfE	Asche
Gerste	87,8	82,3	3,3	1,4	38,2	39,7	5,3

Mit: TS: Trockensubstanz (%), OS: Organsubstanz (%), RP: Rohprotein (%), NfE (N-freie Extraktstoffe (%) Den Inhalt an Gerüstsubstanzen geben Becker/Nehring (1965: 46) mit 41,9% Cellulose, 22,3% Pentosane und 17,2% Lignin, in der Summe 81,4% an.
Jeroch et.al. (1993) geben den Ligningehalt von Wintergerste mit 14,7 % an.

2 Hafer

Das Wort Hafer (lat. Avena) kommt ursprünglich vom altsächsischen hafero und bedeutet „Futter für den Ziegenbock“. Die ursprünglichen Verbreitungsgebiete des Wildhafers sind der Mittelmeerraum, Zentralasien und Nordafrika. In Deutschland ist der Windhafer (Avena fatua) heimisch, von dem wahrscheinlich der heutige Saathafer (Avena sativa) abstammt. Der Hafer hat in den frühen Hochkulturen keine Bedeutung und wurde vermutlich in Norddeutschland in der Bronzezeit erstmals kultiviert.

Hafer bildet im Gegensatz zu Weizen, Gerste und Roggen keine festen Ähren sondern Rispen aus. Jedes Ährchen ist einzeln aufgehängt.

Saathafer ist frostempfindlich und wird daher in Mitteleuropa als Sommergetreide angebaut. Er wird im März gesät und ist von den vier Hauptgetreidearten am spätesten, im August, zu ernten.
Saathafer ist nicht begrannt. Wuchshöhe: 60-150 cm (vgl. Brockhaus 1989a: 346f, Renzenbrink 1993: 144ff, Aufhammer/Fischbeck 1973: 285ff).
Haferstroh gehört aufgrund seiner guten Verdaulichkeit zu den beliebten Futterstrohsorten. Die Rohfasergehalte des Haferstrohs sind deutlich niedriger als die des Weizen- oder Roggenstrohs. (vgl. Becker/Nehring 1965: 43ff)

Hafer

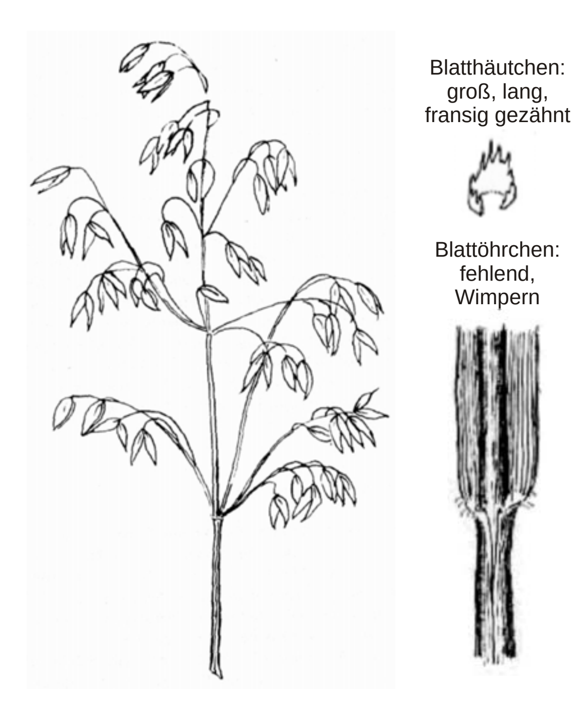


Abbildung 2.1: Hafer (verändert nach Renzenbrink 1993: 146, Aufhammer/Fischbeck 1973: 22)

Tabelle 2.1: Zusammensetzung von Haferstroh (Daten aus Becker/Nehring 1965: 43)

Strohart	TS	OS	RP	Rohfett	Rohfaser	NfE	Asche
Hafer	88,4	82,8	2,7	1,6	40,1	38,6	5,6

Mit: TS: Trockensubstanz (%), OS: Organsubstanz (%), RP: Rohprotein (%), NfE (N-freie Extraktstoffe (%). Den Inhalt an Gerüstsubstanzen geben Becker/Nehring (1965: 39) mit 39% Cellulose, 20,8% Pentosane und 14,4% Lignin, in der Summe 74,2% an.
Jeroch et.al. (1993) geben den Ligningehalt von Hafer mit 13,2 % an.

3 Reis

Reis (lat. Oryza) wurde ab dem vierten Jahrtausend vor Christus zunächst im tropischen Asien (Thailand, China) kultiviert. Reis hat heute größte Bedeutung für die Ernährung vor allem in Asien.
Hauptanbaugebiete sind heute die tropischen und subtropischen Gebiete Asiens und Amerikas.
Es existiert eine ausgesprochen hohe Sortendiversität, denen ein sehr hoher Wasserbedarf gemein ist.
Wie Hafer bildet Reis keine festen Ähren sondern lose Rispen aus. Er erreicht, je nach Sorte und Standort, Wuchshöhen bis zu 1,6 m. (vgl. Brockhaus 1992: 244f, Renzenbrink 1993: 78ff).
Reisstroh gehört laut Becker/Nehring (1965: 50f) wie Haferstroh mit einem mäßigen Rohfaser- und hohen Proteingehalt zu den beliebten Futterstroharten.
Auffällig sind die großen Unterschiede in der Zusammensetzung zwischen den verschiedenen Sorten. Allen gemein ist ein hoher Ascheanteil.





Abbildung 3.1: Reis (verändert nach Renzenbrink 1993: 80, 81)

Tabelle 3.1: Zusammensetzung von Reisstroh (Daten aus Becker/Nehring 1965: 51)

Strohart	TS	OS	RP	Rohfett	Rohfaser	NfE	Asche
Reis	89,0	73,5	4,5	1,5	34,6	32,8	15,4

Mit: TS: Trockensubstanz (%), OS: Organsubstanz (%), RP: Rohprotein (%), NfE (N-freie Extraktstoffe (%). Jeroch et.al. (1993) geben den Ligningehalt von Reis mit 14,2 % an.

4 Roggen

Hauptanbaugebiete des Roggens (lat. Secale cereale) sind Nordeuropa und Sibirien.
Der Roggen wurde vermutlich in den 15.-11. vorchristlichen Jahrhunderten erstmalig in Nordeuropa kultiviert, wo er sich besser an das sich verschlechternde Klima anpassen konnte als Weizen und Gerste. Er diente den Germanen als wichtiges Brotgetreide. Der Anbau wurde von den Slawen und Kelten übernommen.
Roggen ist das anspruchsloseste Getreide. Er stellt an Böden und Klima deutlich geringere Anforderungen als Weizen oder Gerste.

Aufgrund der besseren Ernteerträge wird hauptsächlich Winterroggen angebaut, der im September gesät und im August geerntet wird. Die Vegetationszeit beträgt bis zu 300 Tagen. Die Ähren sind mittellang begrannt, vierkantig und 5-20 cm lang. Wuchshöhe: 65-200 cm. (vgl. Brockhaus 1992: 477f, Renzenbrink 1993: 130ff, Aufhammer/Fischbeck 1973: 155ff).
Die Unterschiede in der Zusammensetzung von Winter- und Sommerroggen sind laut Becker/Nehring (1965: 41) praktisch nicht vorhanden, die Unterschiede zu Weizenstroh gering.

Roggen



Abbildung 4.1: Roggen (verändert nach Renzenbrink 1993: 132, Aufhammer/Fischbeck 1973: 22)

Tabelle 4.1: Zusammensetzung von Roggenstroh (Daten aus Becker/Nehring 1965: 41)

Strohart	TS	OS	RP	Rohfett	Rohfaser	NfE	Asche
Roggen	90,0	86,1	2,9	1,3	41,6	40,3	3,9

Mit: TS: Trockensubstanz (%), OS: Organsubstanz (%), RP: Rohprotein (%), NfE (N-freie Extraktstoffe (%). Jeroch et.al. (1993) geben den Ligningehalt von Winterroggen mit 13,5 % an

5 Weizen und Dinkel

Weizen (lat. Triticum), vom althochdeutschen Weizi: „der Weiße“ (nach der Farbe des Mehls), ist neben der Gerste das älteste Getreide. Wie diese wurde er in den Hochkulturen des Zweistromlandes in der Jungsteinzeit in Züchtung genommen und erlangte besonders bei den Persern kultische Bedeutung. Hauptverbreitungsgebiete sind Eurasien und Nordamerika.
Der Weizen lässt sich in die Arten Einkorn, Emmer und Dinkel aufteilen. Der heutige, in Europa kultivierte Saatweizen (Triticum aestivum) stammt vom Dinkel ab.

Triticale, ein modernes Futtergetreide ist eine Kreuzung aus Weizen (Triticum) und Roggen (Secale).
Saatweizen wird hauptsächlich als Sommer- aber auch als Wintergetreide angebaut. Er braucht einen guten Boden und stellt erhebliche Ansprüche an das Klima.
Saatweizen ist schwach begrannt, die Halmlängen liegen bei modernen Sorten zwischen 70 und 90 cm.
Die Saatzeit für Winterweizen liegt je nach Sorte und klimatischen Gegebenheiten zwischen September und Dezember, jedoch immer nach der Roggenaussaat. Sommerweizen

wird üblicherweise Anfang März gesät. Erntezeit ist im Juli bei Winterweizen, im August nach dem Roggen bei Sommerweizen. (vgl. Brockhaus 1994: 731f, Renzenbrink 1993: 63ff, Aufhammer/Fischbeck 1973: 75ff)

Der Halm wird als lang und lagerschwach beschrieben (vgl. Brockhaus 1988: 515f, Renzenbrink 1993: 71ff, Aufhammer/Fischbeck 1973: 118f). Die Unterschiede in der Zusammensetzung von Winter- und Sommerweizen sind laut Becker/Nehring (1965: 38f) marginal, die Unterschiede zwischen Weizen- und Dinkelstroh nicht wesentlich.

Weizen

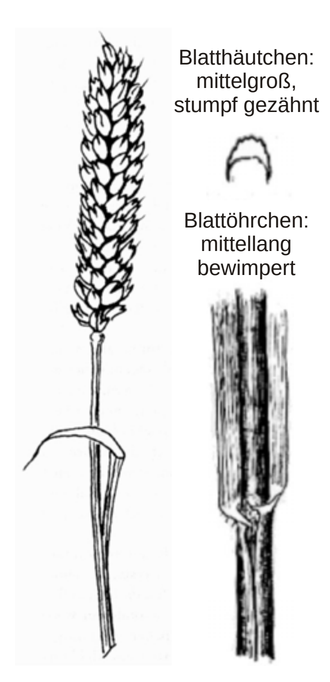


Abbildung 5.1: Weizen (verändert nach Renzenbrink 1993: 69, Aufhammer/Fischbeck 1972: 22)

Dinkel, (lat. Triticum spelta) wird oft als der Urweizen bezeichnet, da er der Vorläufer des heutigen Saatweizens ist. Der winterharte Dinkel ist bezüglich des Standortes und der klimatischen Verhältnisse weniger anspruchsvoll als Weizen, liefert jedoch geringere Erträge. Der Anbau erfolgt praktisch nur als Winterfrucht, da diese einen höheren Ertrag liefert als die Sommersorten.
Als Anbaugebiete werden Eifel, Odenwald, Schwarzwald, Allgäu und die Nordschweiz genannt.

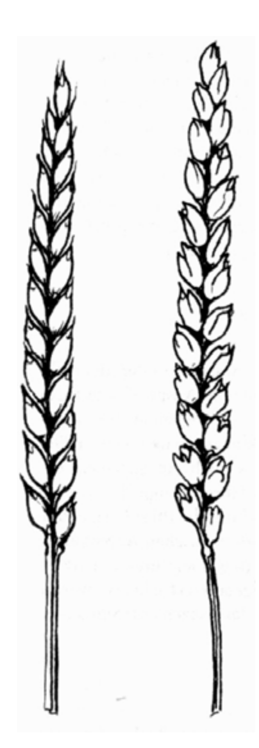


Abbildung 5.2: Kolben- und Schlegeldinkel (Renzenbrink 1993: 68)

Tabelle 5.1: Zusammensetzung von Weizen- und Dinkelstroh (Daten aus Becker/Nehring 1965: 38)

Strohart	TS	OS	RP	Rohfett	Rohfaser	NfE	Asche
Weizen	90,3	84,6	2,6	1,4	33,6	41,3	6,0
Dinkel	84,6	78,8	2,7	1,3	41,3	33,6	5,8

Mit: TS: Trockensubstanz (%), OS: Organsubstanz (%), RP: Rohprotein (%), NfE (N-freie Extraktstoffe (%). Den Inhalt an Gerüstsubstanzen geben Becker/Nehring (1965: 39) mit 39% Cellulose, 20,8% Pentosane und 14,4% Lignin, in der Summe 74,2% an. Jeroch et.al. (1993) geben den Ligningehalt von Winterweizen mit 15,0 % an.

Anhang I.2: Zum Experiment Sorptionsisothermen

1 Sorptionsisotherme von Weizenstroh

Für Weizenstroh stellten sich bei den unterschiedlichen Temperaturen und Luftfeuchten folgende Gleichgewichtsfeuchten ein (Tabelle 1.1) :

Tabelle 1.1: Ermittelte Gleichgewichtsfeuchten von Weizenstroh

relative Luftfeuchte φ (-)	Massebezogener Feuchtegehalt u (g/g)		
	15°C	**23°C**	**40°C**
0,00	0,000	0,000	0,000
0,25	0,052	0,050	0,044
0,40	0,070	0,068	0,060
0,56	0,093	0,093	0,080
0,70	0,129	0,122	0,105
0,85	0,183	0,168	0,151

Für c, u_m, n und die Referenztemperatur wurden gewählt:

c (-)	u_m (g/g)	n (-)	θ_{ref} (°C)
40	0,036	10	40

2 Sorptionsisotherme von Gerstenstroh

Für Gerstenstroh stellten sich bei den unterschiedlichen Temperaturen und Luftfeuchten folgende Gleichgewichtsfeuchten ein (Tabelle 2.1):

Tabelle 2.1: Ermittelte Gleichgewichtsfeuchten von Gerstenstroh

relative Luftfeuchte φ (-)	Massebezogener Feuchtegehalt u (g/g)		
	15°C	**23°C**	**40°C**
0,00	0,000	0,000	0,000
0,25	0,053	0,050	0,042
0,40	0,074	0,071	0,061
0,56	0,101	0,099	0,086
0,70	0,150	0,142	0,123
0,85	0,245	0,229	0,207

Für c, u_m, n und die Referenztemperatur wurden gewählt:

c (-)	u_m (g/g)	n (-)	θ_{ref} (°C)
14	0,04	15,5	40

3 Sorptionsisotherme von Roggenstroh

Für Roggenstroh stellten sich bei den unterschiedlichen Temperaturen und Luftfeuchten folgende Gleichgewichtsfeuchten ein (Tabelle 3.1):

Tabelle 3.1: Ermittelte Gleichgewichtsfeuchten von Roggenstroh

relative Luftfeuchte φ (-)	Massebezogener Feuchtegehalt u (g/g)		
	15°C	**23°C**	**40°C**
0,00	0,000	0,000	0,000
0,25	0,051	0,048	0,040
0,40	0,068	0,066	0,055
0,56	0,089	0,090	0,074
0,70	0,124	0,116	0,097
0,85	0,171	0,156	0,137

Für c, u_m, n und die Referenztemperatur wurden gewählt:

c (-)	u_m (g/g)	n (-)	θ_{ref} (°C)
32	0,033	10,1	40

4 Sorptionsisotherme von Dinkelstroh

Für Dinkelstroh stellten sich bei den unterschiedlichen Temperaturen und Luftfeuchten folgende Gleichgewichtsfeuchten ein (Tabelle 4.1):

Tabelle 4.1: Ermittelte Gleichgewichtsfeuchten von Dinkelstroh

relative Luftfeuchte φ (-)	Massebezogener Feuchtegehalt u (g/g)		
	15°C	**23°C**	**40°C**
0,00	0,000	0,000	0,000
0,25	0,055	0,052	0,043
0,40	0,074	0,070	0,059
0,56	0,097	0,097	0,080
0,70	0,137	0,130	0,106
0,85	0,207	0,185	0,154

Dabei wurden für c, u_m, n und die Referenztemperatur gewählt:

c (-)	u_m (g/g)	n (-)	θ_{ref} (°C)
30	0,0355	11	40

5 Sorptionsisotherme von Bohnenstroh

Für Bohnenstroh stellten sich bei den unterschiedlichen Temperaturen und Luftfeuchten folgende Gleichgewichtsfeuchten ein (Tabelle 5.1):

Tabelle 5.1: Ermittelte Gleichgewichtsfeuchten von Bohnenstroh

relative Luftfeuchte φ (-)	Massebezogener Feuchtegehalt u (g/g)		
	15°C	**23°C**	**40°C**
0,00	0,000	0,000	0,000
0,25	0,060	0,055	0,045
0,40	0,079	0,074	0,062
0,56	0,102	0,102	0,083
0,70	0,144	0,134	0,108
0,85	0,220	0,179	0,152

Für c, u_m, n und die Referenztemperatur wurden gewählt:

c (-)	u_m (g/g)	n (-)	θ_{ref} (°C)
28	0,0365	10,5	40

6 Sorptionsisotherme von Hanffasern

Für Hanffasern stellten sich bei den unterschiedlichen Temperaturen und Luftfeuchten folgende Gleichgewichtsfeuchten ein (Tabelle 6.1):

Tabelle 6.1: Ermittelte Gleichgewichtsfeuchten von Hanffasern

relative Luftfeuchte φ (-)	Massebezogener Feuchtegehalt u (g/g)		
	15°C	**23°C**	**40°C**
0,00	0,000	0,000	0,000
0,25	0,055	0,050	0,041
0,40	0,072	0,069	0,057
0,56	0,096	0,095	0,078
0,70	0,139	0,129	0,103
0,85	0,220	0,180	0,147

Für c, u_m, n und die Referenztemperatur wurden gewählt:

c (-)	u_m (g/g)	n (-)	θ_{ref} (°C)
28	0,035	10,6	40

7 Sorptionsisotherme von Switchgras

Für Switchgras stellten sich bei den unterschiedlichen Temperaturen und Luftfeuchten folgende Gleichgewichtsfeuchten ein (Tabelle 7.1):

Tabelle 7.1: Ermittelte Gleichgewichtsfeuchten von Switchgras

relative Luftfeuchte φ (-)	Massebezogener Feuchtegehalt u (g/g)		
	15°C	**23°C**	**40°C**
0,00	0,000	0,000	0,000
0,25	0,056	0,048	0,036
0,40	0,071	0,065	0,052
0,56	0,093	0,090	0,070
0,70	0,130	0,119	0,090
0,85	0,186	0,156	0,123

Dabei wurden für c, u_m, n und die Referenztemperatur gewählt:

c (-)	u_m (g/g)	n (-)	θ_{ref} (°C)
25	0,0305	9,7	40

8 Sorptionsisotherme von Miscanthus

Für Miscanthus stellten sich bei den unterschiedlichen Temperaturen und Luftfeuchten folgende Gleichgewichtsfeuchten ein (Tabelle 8.1):

Tabelle 8.1: Ermittelte Gleichgewichtsfeuchten von Miscanthus

relative Luftfeuchte φ (-)	Massebezogener Feuchtegehalt u (g/g)		
	15°C	**23°C**	**40°C**
0,00	0,000	0,000	0,000
0,25	0,040	0,037	0,031
0,40	0,058	0,055	0,044
0,56	0,078	0,078	0,062
0,70	0,115	0,104	0,082
0,85	0,160	0,137	0,112

Für c, u_m, n und die Referenztemperatur wurden gewählt:

c (-)	u_m (g/g)	n (-)	θ_{ref} (°C)
18	0,027	10,2	40

Anhang I.3: Recherche marktüblicher HD- und Q-Ballenpressen und ihrer Eigenschaften

1 Hochdruck-Kleinballenpressen (HD-Ballenpressen)

1.1 Allgemeines

Hochdruck-Kleinballenpressen gelten als ausgereift, d. h. die Technik kann unter betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten für ihre originäre Aufgabe nicht weiter verbessert werden. Die Pressen werden seit den späten siebziger Jahren nahezu unverändert gebaut.
HD-Ballenpressen sind heute noch weit verbreitet. Sie werden vor allem von kleinen und mittleren Betriebe benutzt. Von Vorteil sind die geringen Abmessungen der Ballen und der Maschinen vor allem bei beengten Verhältnissen auf Feld und Hof sowie der niedrige Kraftbedarf der Pressen.
Für HD-Ballenpressen sprechen sowohl der moderate Anschaffungspreis als auch die leichte Handhabbarkeit der Ballen. Trotz dieser Vorteile haben viele Hersteller die Produktion zugunsten von Quader- und Rundballenpressen eingestellt. In Tabelle 1.1 sind typische Kenngrößen von HD-Ballenpressen zusammengestellt.

Tabelle 1.1 Typische Kenngrößen von HD-Ballenpressen

Übliche Ballengrößen (cm) [1]	Dichte (Kg/m³)[1]	Durchsatz t/h[1]	Anzahl Knoter[1]	Kraftbed. (Zapfwelle, kW) [1]	Preis (€/Maschine) [1]	Preis (€/Ballen) [2]
36 x 46-49 x 30-130	Bis 120	bis 20	2	30-50	16.500- 25.500	0,27-0,41

[1] [Tabelle 1.3, Tabelle 1.4] Preis inkl. MwSt., Grundmodell; [2] [KTBL1] Preis inkl. MwSt. bei Lohnproduk-tion für das Pressen der Ballen

1.2 Überblick Hersteller von HD-Ballenpressen (Auswahl)

Unter den wenigen Firmen, die noch Hochdruck-Kleinballenpressen produzieren, sind das Traditionsunternehmen Welger, der John Deere-Konzern und die zur AGCO Corporation gehörende Massey Ferguson.

1.2.1 Welger

Tabelle 1.2 enthält einen historischen Überblick über die Fa. Welger.

Tabelle 1.2: Historischer Überblick Fa. Welger (Bauer 2003, welger.com, Zugriff am 11.07.2007)

Jahr	Ereignis
1865	Gründung durch Franz und Gustav Welger
1901	Patent auf die weltweit erste automatisch bindende Ballenpresse
1928	Erste Versuche mit Aufsammelpressen
1951	Markteinführung der ersten Hochdruck-Kleinballenpresse AP 15
1972	Beginn der Produktion von stationären Pressen zur Verdichtung von Abfallstoffen
1974	Patenterteilung auf die erste Rundballenpresse der Welt
1985	Markteinführung der ersten Welger-Großballenpresse
1990	Marktanteil von Welger HD-Ballenpressen liegt in Westdeutschland bei 55%
1994	Übernahme durch den niederländischen Lely-Konzern
2004	Welger wird wieder unabhängig

Welger fertigt Hochdruck-Kleinballenpressen in vier Varianten, die sich hauptsächlich durch die Pick-up Breite, den Kraftbedarf und die Durchsatzleistung unterscheiden. In den Maschinen kommen zur Kraftübertragung nur Zahnräder und drehsteife Wellen zum Einsatz (vgl. Welger 1). Abbildung 1.1 zeigt eine Welger HD-Ballenpresse im Einsatz, Tabelle 1.3 enthält die Kenndaten der Welger HD-Ballenpressen.



Abbildung 1.1 Welger Hochdruck-Kleinballenpresse (Welger 1)

Tabelle 1.3 Kenndaten Welger Hochdruck Kleinballenpressen

Modell	Ballengröße (H x B x T. cm)[1]	Dichte (kg/m³)[2]	Durchsatz (t/h)[2]	Anzahl Knoter[1]	Preis (€/Maschine)[3]	Kraftbedarf (Zapfwelle, kW)[2]
AP 530	36 x 48 x 50-120	110	12	2	17.535	30
AP 630	36 x 49 x 50-120	120	15	2	20.495	40
AP 730	36 x 49 x 50-120	120	18	2	24.230	45
AP 830	36 x 49 x 50-120	120	20	2	25.580	50

[1] Welger (1); [2] Czok (2005); [3] Welger (2005) inkl. MwSt., Grundmodell

1.2.2 John Deere

John Deere wurde 1837 in Grand Detur/Illinois USA als Pflugschmiede gegründet und ist heute einer der weltgrößten Landmaschinenproduzenten. John Deere übernahm auch einige deutsche Landtechnik-Firmen wie z. B. Lanz Mannheim. John Deere-Kleinballenpressen werden in Frankreich produziert.
Der Absatz schwankt weltweit sehr stark, abhängig z. B. von Großaufträgen aus China. Die Verkaufszahlen liegen in guten Jahren weltweit im vierstelligen, in Deutschland im unteren zweistelligen Bereich. Die Pressen werden seit den späten 70er Jahren des vorigen Jahrhunderts unverändert produziert (vgl. Bauer 2003, Heinold 2005a).
Das Pressgut wird dem Raffer und dem Presskanal von der Pick-up durch eine Förderschnecke zugeführt und dabei leicht vorverdichtet.
Als Zubehör ist z. B. ein Riffelblech, welches in den Presskanal zur Verstärkung der Reibung im Presskanal und damit zur Erhöhung der Pressdichte führt, lieferbar. Für alle Modelle sind hydraulische Pressdichteneinstellungen lieferbar.
John Deere bietet seine Hochdruck-Kleinballenpressen derzeit in drei Varianten an, die sich durch den Kraftbedarf, durch die Anzahl der Zinken und Zinkenreihen sowie die Pick-up-Breite, durch die Zahl der Kolbenhübe und die Arbeitsgeschwindigkeit unterscheiden (siehe Tabelle 1.4). Das Modell 459 verfügt über einen elektrisch angetriebenen Knoter (vgl. Heinold 2005a, John Deere 2003). Abbildung 1.2 zeigt schematisch die Elemente einer John-Deere HD-Ballenpresse mit Förderschnecke.

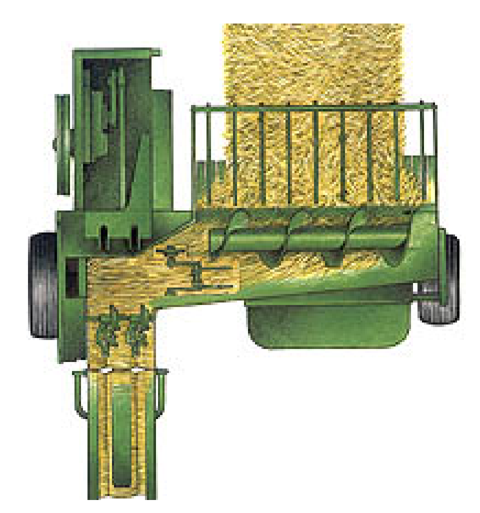


Abbildung 1.2 John Deere Hochdruck-Kleinballenpresse mit Förderschnecke (john-deere.de)

Tabelle 1.4 Kenndaten John Deere Hochdruck-Kleinballenpressen

Modell	Ballengröße (H x B x L, cm)[1]	Dichte (kg/m³)[2]	Durchsatz (t/h)	Anzahl Knoter[1]	Preis (€/Maschine)[3]	Kraftbedarf (Zapfwelle, kW)[1]
349	36 x 46 x 30-130	100	kA	2	17.740	30
359	36 x 46 x 30-130	100	kA	2	20.010	35
459	36 x 46 x 30-130	115	kA	2	23.260	45

[1] John Deere (2003); [2] Heinold (2005) Wert gilt für Grundmodell. Bei Einbau von Riffelblechen kann die Dichte erhöht werden; [3] Preis für Grundmodell aus dem Produktkonfigurator auf john-deere.de, Zugriff am 11.07.2007, inkl. 19% MwSt.

1.2.3 Massey Ferguson

Massey Ferguson (MF) wurde 1953 durch die Fusion der amerikanischen Firma Massey-Harris und des englischen Unternehmens Ferguson gegründet. Seit 1995 gehört MF zur US-Amerikanischen AGCO Corporation.
Die Ende 2006 auf den deutschen Markt gekommenen HD-Ballenpressen der Serie 1800 fallen durch ihre zentral unter der Presskammer angeordnete Pickup auf. Dieses sonst nur bei Großballenpressen anzutreffende Konstruktionsmerkmal ermöglicht es, den Gutstrom durch zwei Zentrierschnecken exakt zu dosieren, in einer Vorpresskammer zu verdichten und in den Presskanal einzubringen, ohne

dass das Gut wie bei den anderen vorgestellten Pressen geschnitten werden muss. Der Kraftaufwand sinkt dadurch erheblich. Durch die Vorkomprimierung kann der Kolbenhub verringert werden, der Durchsatz steigt. Ergebnis dieser Neuentwicklung ist ein deutlich geringerer Kraftbedarf der Presse sowie gleichmäßigere und dichtere Ballen (vgl. Massey Ferguson 2007).
MF-Pressen der Modellreihe 1800 scheinen im HD-Ballensegment die Maschinen zu sein, welche die beste Eignung für die Herstellung von Baustrohballen erwarten lassen.
Anmerkung: Massey-Ferguson und Hesston gehören beide zum AGCO Konzern. Die MF-Pressen der Serie 1800 sind baugleich mit den am nordamerikanischen Markt angebotenen Hesston-Modellen der Serie 4500.
Abbildung 1.3 zeigt eine das Funktionsprinzip der MF-Pressen und eine MF 1839 im Einsatz, Tabelle 1.5 gibt Auskunft über die Kenndaten der MF-Pressen.



Abbildung 1.3 MF 1839 mit Center-Line-Technologie (verändert nach Massey Ferguson 2007: 2, 3)

Tabelle 1.5 Kenndaten Massey Ferguson Hochdruck-Kleinballenpressen

Modell	Ballengröße (H x B x L, cm)[1]	Dichte (kg/m³)[2]	Durchsatz (t/h)	Anzahl Knoter[1]	Preis (€/Maschine)[3]	Kraftbedarf (Zapfwelle, kW)[1]
MF 1835	36 x 46 x 31-132	kA	kA	2	kA	22
MF 1837	36 x 46 x 31-132	kA	kA	2	kA	26
MF 1839	36 x 46 x 31-132	kA	kA	2	kA	26

[1] Massey Ferguson 2007: 4; [2] [3]

2 Quaderballenpressen

2.1 *Allgemeines*

Quaderballenpressen, je nach Hersteller auch Großballen- oder Großpackenpressen, kurz Q-Ballenpressen genannt, stellen die neueste Pressenart dar. Sie wurden Mitte der achtziger Jahre eingeführt und bergen noch Entwicklungspotential.

Quaderballenpressen werden von allen großen Herstellern produziert. Aufgrund ihres hohen Kaufpreises rechnen sich diese Pressen nur für den Lohneinsatz oder in sehr großen landwirtschaftlichen Betrieben. Werden die Kapazitäten der Maschinen ausgeschöpft, arbeiten sie konkurrenzlos preisgünstig. Es wird vor allem Arbeitszeit beim Pressen und Transportieren der Ballen eingespart. Die enormen Abmessungen der Ballen (bis zu 120 x 130 x 270 cm) und ihr hohes Gewicht (bis zu 500 kg/m³) bedingen einen erhöhten Maschineneinsatz. In Tabelle 2.1 sind typische Kenngrößen von Quaderballenpressen zusammengestellt. Der Nutzungsumfang von Quaderballenpressen wird in KTBL (2004) mit acht Jahren und 100.000 t Stroh angegeben.

Aus den zahlreichen Quaderballenpressen herstellenden Unternehmen wurden die in Deutschland produzierenden Firmen Welger, Krone und Claas ausgewählt. Folgend werden sie und ihre Pressen kurz vorgestellt.

Tabelle 2.1 Typische Kenngrößen von Quaderballenpressen

Übliche Ballengrößen (H x B x L, cm)[1]	Dichte kg/m³[1]	Durch-satz (t/h)[1]	Anzahl Knoter[1]	Kraftbed. (Zapfwelle, kW)[1]	Preis (€/Maschine)[1]	Preis[2] (€/m Ballen)
50-120 x 80-130 x 70-300	bis 220	bis 32	4-6	59-92	87.000- 143.000	1,20-2,80

[1] vgl. Tabellen 2.2-2.4 Tabelle 2.4Preis inkl. MwSt., Grundmodell; [2] KTBL 2004 Preis inkl. MwSt. bei Lohnproduktion für das Pressen der Ballen

2.2 Überblick über Hersteller von Q-Ballenpressen (Auswahl)

2.2.1 Welger

Die Entwicklung der Firma Welger wurde bereits oben skizziert. Quaderballenpressen von Welger, die dort unter Großballenpressen firmieren, kamen 1985 an den Markt. Wie bei den HD-Ballenpressen verwendet Welger auch bei seinen Großballenpressen zur Kraftübertragung keine Ketten oder Riemen sondern Wellen und Zahnräder. Die Pressen D 4060 und 6060 verfügen serienmäßig über eine Eigenstromversorgung. Beide Pressen sind mit einer Schneideeinrichtung ausgestattet, die das Erntegut nach dem Aufsammeln bei Bedarf zerkleinert. Der Kolben wird zentral geschmiert. Ebenfalls zur Serienausstattung gehört die Tandemachse, der Doppelknoter und das Kontroll- und Steuersystem E-Link, das die Funktion der Presse permanent überwacht, alle Betriebszustände auf einem Display im Schlepper graphisch anzeigt und die Maschine von dort aus steuerbar macht. Der Kolben arbeitet mit 64 Hüben pro Minute. Die Pressdruckregulierung erfolgt elektro-hydraulisch. Abbildung 2.1 zeigt ein Welger Großballenpresse 6006, Tabelle 2.2 können die Kenngrößen von Welger Großballenpressen entnommen werden.



Abbildung 2.1 Welger Großballen-Presse D 6006 (welger.de, Zugriff am 11.07.2007)

Tabelle 2.2 Kenndaten Welger Großballenpressen

Modell	Ballengröße (H x B x L, cm) [1]	Dichte (kg/m³) [2]	Durchsatz (t/h) [2]	Anzahl Knoter [1]	Preis (€/Maschine) [3]	Kraftbedarf (Zapfwelle, kW) [1]
D4006	70 x 80 x 90-250	150	25	4	87.480 €	77
D6006	70 x 120 x 90-250	150	32	6	98.805 €	92

[1] Welger (2); [2] Czok (2005); [3] Welger (2005) inkl. MwSt., Grundmodell

2.2.2 Krone

Die Firma Krone wurde 1906 von Bernd Krone in Spelle im Emsland als Hufbeschlagsschmiede gegründet. Erst 1978 stieg Krone ins Strohpressengeschäft ein. Angeboten wurden zunächst nur Rundballenpressen, ab 1994 auch Quaderballenpressen (bei Krone Großpackenpressen). Krone ist eine Firma mit hoher Innovationskraft. 2001 erhielten Großpackenpressen mit dem VFS System (Variables Füll System) die Möglichkeit, auch bei unterschiedlich großen Schwaden und alternierender Fahrgeschwindigkeit gleichmäßig dichte Ballen zu pressen. Das Stroh wird in einer Vorkammer vorkomprimiert und gelangt erst in die Hauptkammer, wenn die Vorkammer vollständig gefüllt ist (siehe Abbildung 2.2).
Seit 2004 steht für die BiG Pack 1270 das MultiBale-Modul zur Verfügung, welches bis zu sechs kleinere Ballen in einen Großballen einbindet. Ermöglicht wird dies durch eine geteilte Nadelschwinge. Die Unterteilungen der Großballen werden mit je zwei Schnüren, das Gesamtpaket mit vier Schnüren gebunden (Abbildung 2.3). Ein 120 cm langer Ballen, der quer zur Wand gebunden und nur zweimal geschnürt ist, scheint jedoch nicht zum Bauen mit Strohballen geeignet.

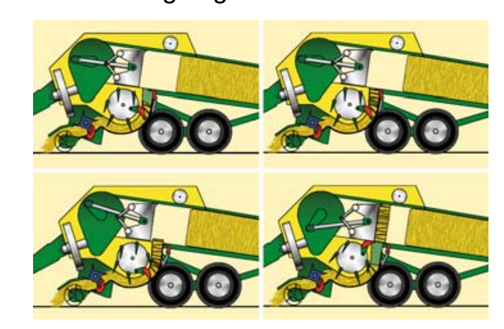


Abbildung 2.2 Krone VFS (Krone 2003:6, 7)

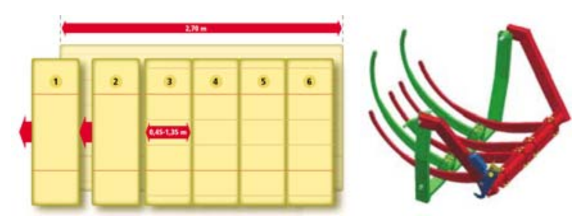


Abbildung 2.3 Krone MultiBale: 6 kleine Ballen in einem großen, geteilte Nadelschwinge (verändert nach Krone 2003: 10, 11)

2005 wurde das Modell 1290 HDP (HDP = Höchst-Druck-Presse) vorgestellt, das laut erster Fahrberichte (Wilmer 2005: 30f, Land & Forst

2005: 74) Ballen mit einer Dichte von bis zu 220 kg/m³ herstellen kann. Ab 90 cm Kanalhöhe werden serienmäßig Doppelknoter eingebaut, alle Knoter werden automatisch druckluftgereinigt. Abbildung 2.4 zeigt eine Krone BiG Pack,

Tabelle 2.3 können die Kenndaten der Krone Großpackenpressen entnommen werden



Abbildung 2.4 Krone Großpackenpresse BiG Pack (Krone 2003)

Tabelle 2.3 Kenndaten Krone-Großballenpressen „BiG Pack“

Modell	**Ballengröße (H x B x L, cm)** [1]	**Dichte (kg/m³)**[2]	**Durchsatz (t/h)**[2]	**Anzahl Knoter**[1]	**Preis (€/Maschine)**[3]	**Kraftbedarf (Zapfwelle, kW)** [1]
890	80 x 90 x 100-720	150		4	102.370	65 kW
1270	70 x 120 x 100-270	150	20	6	118.401	69 kW
1290	90 x 120 x 100-270	150	25	6	119.352	77 kW
1290 HDP	90 x 120 x 100-320	220[4]	25	6	176.320[4]	110 kW[4]
12130	130 x 120 x 100-270	150	36	6	143.492	90 kW

[1] Krone 2003; [2] Telefonat mit Krone Mitarbeiter Hr. Deimel am 09.06.05; [3] Krone (2004), Preis inkl. MwSt [4] Wilmer (2005)

2.2.3 CLAAS

Die deutsche Traditionsfirma CLAAS wurde 1913 gegründet und mischte von Anfang an bei Entwicklung und Vertrieb von Strohballenpressen mit. 1921 erhielt sie ein erstes Patent auf einen Knoter, 1936 wurde der erste Mähdrescher des Kontinents vorgestellt. 1955 erfolgte eine Spezialisierung auf Pressen und Mähdrescher. 1976 wurden die ersten Rundballen-, 1988 die ersten Quaderballenpressen produziert. 1995 kam jede dritte in Europa verkaufte Großballenpresse von CLAAS. CLAAS-Großballenpressen werden in Metz/Frankreich hergestellt.

CLAAS produziert heute vier Modellreihen von Großballenpressen. Die kleine QUADRANT 1150, die größeren QUADRANT 2100 und 2200 sowie die 2007 neu auf den Markt gekommene QUADRANT 3400. Die CLAAS QUADRANT 1150 stellt mit Ballenabmessungen von 50 x 80 x 70-240 cm Ballen her, die zwischen den HD-Ballenpressen und Quaderballenpressen liegen. Die Zuordnung zu Quaderballenpressen wurde vorgenommen, weil die Aufnahme des Pressgutes nicht seitlich der Maschine wie bei HD-Ballenpressen erfolgt. Die Modelle der 2000-Baureihe können mit dem Roto- und dem Powerfeedsystem ausgestattet werden, die die Aufnahme des Schwads optimieren und das Erntegut vorverdichten. Auch sind diese Modelle mit dem Rotocut bzw. Finecut-System lieferbar, welches das Stroh vor dem Pressen häckselt. Alle Modelle können mit Knoterreinigungseinrichtungen ausgerüstet werden. Alle Modelle der Baureihe 2000 (bis auf QUADRANT 2100 ohne Rotor) sind mit dem elektronischen Steuer- und Informationssystem „Communicator“ ausgerüstet, das die komplette Überwachung und Steuerung der Presse von der Fahrerkabine aus ermöglicht. Die Ballenlänge lässt sich in 1 cm-Schritten einstellen. Abbildung 2.5 zeigt eine CLAAS QUADRANT 3400 Quaderballenpresse, Tabelle 2.4 können die Kenngrößen von CLASS Quaderballenpressen entnommen werden.



Abbildung 2.5: CLAAS Großballenpresse QUADRANT 3400 (verändert nach Claas 2006d: 35)

Tabelle 2.4: **Kenndaten zu CLAAS QUADRANT Großballenpressen**

Modell	Ballengröße (H x B x L, cm)	Dichte (kg/m^3)[3]	Durch-satz (t/h)	Anzahl Knoter	Preis (€/Maschine)[4]	Kraftbedarf (Zapfwelle, kW)
1150	50 x 80 x 70-240[2]	170[5]	kA	4[1]	kA	59 [1]
2100 R	70 x 80 x 120-250[2]	190	kA	4[2]	kA	80 [3]
2200 R	70 x 120 x 90-300[2]	200	kA	6[2]	104.400	91 [3]
3400	100 x 120 x 100-300[6]	kA	kA	6[6]	kA	kA

[1] Claas (2004); [2] Claas (2003), [3] Claas (2004a) [4] Peperhowe (2005) Preis inkl. MwSt. [5] Claas (2003a) Ballengewicht bei Stroh: 135 kg, Ballenabmessungen: 50 x 80 x 200 cm; [6] Claas (2006d)

3 3-String-Baler: Eine US-amerikanische Besonderheit

3.1 Allgemeines

Während in Europa HD-Ballenpressen mit zwei Garnbindungen und Quaderballenpressen mit vier bis sechs Garnbindungen marktgängig sind, existiert in den USA eine breite Palette so genannter 3-String-Baler, die Ballen mit drei Garnbindungen herstellen, welche gern zur Herstellung lasttragender Gebäude verwendet werden. Da solche 3-String-Ballen auch zu einigen in dieser Arbeit beschriebenen Tests herangezogen wurden und sich die amerikanische Strohballenliteratur auf diese Ballen bezieht, wird anhand von drei Beispielen auf 3-String-Baler eingegangen.
Neben gezogenen Ballenpressen, wie sie in Deutschland üblich sind, werden in den Vereinigten Staaten von Amerika auch eine Reihe selbst fahrender Pressen (siehe Abbildung 3.1) mit 2-String- oder 3-String-Ballenkammern angeboten. Laut King (2006: 1) haben 3-String-Baler typische Abmessungen von 40x58x118 cm bei einem Gewicht von 34-43 kg, was Dichten zwischen ρ= 124-157 kg/m^3 entspricht. Damit liegen die Dichten der 3-String-Bales deutlich über den der hiesigen HD-Ballen und eher im Bereich der Quaderballen.



Abbildung 3.1: Selbstfahrende Freeman-Ballenpresse (freeman.com, Zugriff am 9.07.2007)

3.2 Beispiele für 3-String-Baler

3.2.1 Freeman Serie 300 Pull-Type Baler

Die Freeman-Ballenpressen der Serie 300 sind gezogene Ballenpressen, die standardmäßig zur Herstellung von zwei unterschiedlichen Ballengrößen lieferbar sind. Im Gegensatz zu hiesigen Maschinen werden diese Pressen nicht über eine Zapfwelle angetrieben, sondern verfügen über ein Dieselaggregat zur Eigenversorgung mit der nötigen Prozessenergie. Die Ballendichte kann hydraulisch reguliert werden (vgl. Freeman 1995). Abbildung 3.2 zeigt einen Freeman 370 Pull-Type Baler im Einsatz, Tabelle 3.1 können die Kenndaten von Pressen der Freeman 300 Serie entnommen werden.



Abbildung 3.2: Freeman 370 Pull-Type Baler (Freeman 1995: 1)

Tabelle 3.1: Spezifikationen der Freeman 300-Serie (vgl. Freeman 1995: 5)

Modell	Ballengröße (h x b x l, cm)	Dichte (kg/m³) max.	Durch-satz (t/h)	Anzahl Knoter	Preis (€/Maschine)	Kraftbedarf (eigene Erzeu-gung, kW)
Freeman 300 Series	38 x 56 x 46-132 41 x 56 x 46-132	270 (in Alfalfa)	18 (in Stroh)	3	kA kA	48

3.2.2 New Holland BB900 Square Baler

Der nicht im europäischen Sortiment angebotene New-Holland BB900 Baler ist eine gezogene 3-String-Strohballenpresse, die wie die Freeman 300-Pressen durch ein eigenes Dieselaggregat mit Energie versorgt wird.
Die Pressdichte lässt sich hydraulisch regulieren Auch hier sind 2 Kanalgrößen mit 15 oder 16 Inch Breite lieferbar (vgl. New Holland 2005: 1f). Abbildung 3.3 zeigt eine New Holland BB 900 im Einsatz. Kenngrößen zu dieser Maschine können Tabelle 1.1 entnommen werden.



Abbildung 3.3: New Holland BB 900 (verändert nach newholland.com, Zugriff am 09.07.2007)

Tabelle 3.2: Spezifikationen der New Holland BB900 (vgl. New Holland 2005: 1f)

Modell	Ballengröße (h x b x l, cm)	Dichte (kg/m³) max.	Durch-satz (t/h)	Anzahl Knoter	Preis (€/Maschine)	Kraftbedarf (eigene Erzeu-gung, kW)
New Holland BB900	38 x 56 x 31-132 41 x 56 x 31-132	270 (in Alfalfa)	18 (in Stroh)	3	kA kA	47

3.2.3 Hesston 4690S Three Twin Baler

Die Marke Hesston ist ausschließlich auf dem nordamerikanischen Markt präsent. Wie die zuvor beschriebenen Modelle verfügt auch die Hesston 6690S über eine eigene Energieversorgung, die es ermöglicht, mit relativ leistungsschwachen Schleppern zu arbeiten. Ferner ist die Presse somit unabhängig von der Zapfwellendrehzahl des Schleppers, was die Möglichkeit eröffnet, die benötigte Leistung optimal an die Gegebenheiten anzupassen. Ähnlich der MF 1800-Serie (siehe 1.2.3) wird bei den Hesston Maschinen das Stroh vorkomprimiert (vgl. Hesston: 2f). Abbildung 3.4 zeigt das Funktionsprinzip der Hesston 4690S und die Maschine im Einsatz. Aus Tabelle 3.3 können die Spezifikationen der Presse entnommen werden.



Abbildung 3.4: Hesston 4690S (verändert nach Hesston: 2, 8)

Tabelle 3.3: Spezifikationen der Hesston 4690S (vgl. Hesston: 3f)

Modell	Ballengröße (h x b x l, cm)	Dichte (kg/m³) max.	Durch-satz (t/h)	Anzahl Knoter	Preis (€/Maschine)	Kraftbedarf (eigene Erzeu-gung, kW)
Hesston 4690S	37 x 58 x 31-132	164	kA	3	kA	50

Anhang I.4: Ermittlung des Primärenergiegehaltes von Strohballen

Inhalt

1 Zusammenfassung

1.1 Primärenergiegehalt gemittelt (Rechenwert)

HD-Ballen	63 kWh/Mg	226,8 MJ/Mg
Quaderballen	50 kWh/Mg	180 MJ/Mg

1.2 Primärenergiegehalt von Strohballen bei Betrachtung unterschiedlicher Szenarien

Szenario/ Teilverbrauch	HD-Ballen	HD-Ballen	Q-Ballen	Q-Ballen	Stroh als
Ballen Pressen	149,426	160,248	40,960	102,918	1129,202
Bindegarn	69,300	69,300	74,118	74,118	74,118
Transport zum Hof, (Laden und Entladen der Ballen mit Frontlader)	1,808	7,231	27,011	35,831	27,011
Summe (MJ/Mg)	220,534	236,778	142,088	212,866	1230,330
Summe (kWh/Mg)	61,259	65,772	39,469	59,130	341,758

2 Szenarien

2.1 HD-Ballen günstig:

Es steht ebener, mittelschwerer Boden an. Die Schlaggröße beträgt 20 ha, die Arbeitsbreite des Mähdreschers (=Schwadabstand) 4,15 m. Pro ha liegt eine Strohmenge von 5 t auf dem Feld. Der Dieselbedarf zum Pressen beträgt unter diesen Bedingungen 11l/ha. Pressen mit HD-Ballenpresse (Ballengröße: 36x45x75 cm). Die Ballen gelangen nach dem Pressen über eine Ballenschurre auf den Folgehänger, wo sie per Hand aufgeschichtet werden. 2 km Transport zum Hof (1 km Entfernung, Hin- u. Rückfahrt), Abladen per Hand.

2.2 HD-Ballen ungünstig

Es steht ebener, mittelschwerer Boden an. Die Schlaggröße beträgt 2 ha, die Arbeitsbreite des Mähdreschers (=Schwadabstand) 2,75 m. Pro ha liegt eine Strohmenge von 4 t auf dem Feld. Der Dieselbedarf zum Pressen beträgt unter diesen Bedingungen 9,5l/ha. Pressen mit HD-Ballenpresse (Ballengröße: 36x45x75 cm). Die Ballen gelangen nach dem Pressen über eine Ballenschurre auf den Folgehänger, wo sie per Hand aufgeschichtet werden. 8 km Transport zum Hof (4 km Entfernung, Hin- und Rückfahrt), Abladen per Hand.

2.3 Q-Ballen günstig

Es steht ebener, mittelschwerer Boden an. Die Schlaggröße beträgt 20 ha, die Arbeitsbreite des Mähdreschers (=Schwadabstand) 8,0 m. Pro ha liegt eine Strohmenge von 5 t auf dem Feld. Der Dieselbedarf der Presse beträgt unter diesen Bedingungen 3,02 l/ha. Pressen mit Quaderballenpresse (Ballengröße:120x70x220 cm, Ballengewicht: 255 kg). Die Ballen werden mittels eines Frontladers geladen, mit dem landwirtschaftlichen Zug 2t 2 km zum Hof transportiert (1 Km Entfernung, Hin- und Rückfahrt) dort wieder mit einem Frontlader entladen. Für das Laden und Entladen werden 3,02 l Diesel/ha benötigt [KTBL 2004a]

2.4 Q-Ballen ungünstig

Es steht ebener, mittelschwerer Boden an. Die Schlaggröße beträgt 2 ha, die Arbeitsbreite des Mähdreschers (=Schwadabstand) 5,6 m. Pro ha liegt eine Strohmenge von 4 t auf dem Feld. Der Dieselbedarf der Presse beträgt unter diesen Bedingungen 4,47 l/ha. Pressen mit Quaderballenpresse (Ballengröße:120x70x220 cm, Ballengewicht: 255 kg). Die Ballen werden mittels eines Frontladers geladen, mit dem landwirtschaftlichen Zug 8 km zum Hof transportiert (4 km Entfernung, Hin- und Rückfahrt) und dort wieder mit einem Frontlader entladen. Für das Laden und Entladen werden insgesamt 3,02 l Diesel/ha benötigt [KTBL 2004a]

2.5 Stroh als Hauptprodukt aus ökologischem Anbau

Wenn das Stroh nicht als Abfallprodukt sondern als Hauptprodukt behandelt wird und das Getreide dementsprechend als Nebenprodukt, müssen alle vorhergehenden Prozessschritte der Getreidekultivierung auf das Stroh angerechnet werden. Basierend auf dem Szenario "Q-Ballen günstig" wurde dieses Szenario berechnet, das für alle Arbeitsschritte zum Getreideanbau einen Gesamtdieselbedarf von 92 Litern/ha enthält. Energie- und Materialbedarf zur Herstellung von Dünger, Pflanzenschutzmitteln usw. gehen nicht in die Berechnung ein.

3 Berechnungen

3.1 Einergieinhalt von Dielsel

Brennw. Diesel	45,595	MJ/kg	GEMIS Diesel-D-2000
Dichte Diesel	0,85	kg/l	http://rapsoel.onlinehome.de/images/de_was_ist_was.htm#diesel
Primärenergiefaktor Diesel	1,14		http://www.lga.de/de/bdb/g0000016.shtml
1 Liter Diesel entspricht	**61,151**	**MJ**	

3.2 Umrechnung MJ in kWh

1 J = 1 Ws

1 MJ =	**0,278**	**kWh**

3.3 Herstellungsenergiebedarf Maschinen (Prozesse 2. Ordnung)

3.3.1 Großballenpresse Krone 1270

Masse Presse	7240	kg/Fahrzeug	[Krone 2005]
Stahl, niedriglegiert	43	MJ/kg	[Waltjen 1999]
Gesamtnutzung	100000	Mg	[KTBL 2004: 53]
PEI Fahrzeug	311320	MJ	
PE Bedarf Fahrzeug/Mg Stroh	**3,113**	MJ/Mg	

3.3.2 Kleinballenpresse Welger AP 930

Masse Presse	2210	kg/Fahrzeug	[Welger 1]
Stahl, niedriglegiert	43	MJ/kg	[Waltjen 1999]
Gesamtnutzung	9000	Mg	[KTBL 2004: 53]
PEI Fahrzeug	95030	MJ	
PE Bedarf Fahrzeug/Mg Stroh	**10,559**	MJ/Mg	

3.3.3 Schlepper Claas CELTIS 456 53 kW

Masse Schlepper	3730	kg/Fahrzeug	[Claas 2006e]

Stahl, niedriglegiert	43	MJ/kg	[Waltjen 1999]
Gesamtnutzung	10000	h	[KTBL 2004: 53]
PEI Fahrzeug	160390	MJ	
Herstellungs PE Bedarf Fahrzeug/h	**16,039**	MJ/h	

3.3.4 Schlepper Claas AXION 830 149 kW

Masse Schlepper	7396	kg/Fahrzeug	[Claas 2006f]
Stahl, niedriglegiert	43	MJ/kg	[Waltjen 1999]
Gesamtnutzung	10000	h	[KTBL 2004: 53]
PEI Fahrzeug	318028	MJ	
Herstellungs PE Bedarf Fahrzeug/h	**31,803**	MJ/h	

3.3.5 Anhänger 8 t (2x= 16t)

Anhänger Metall\Stahl-D-Mix	2500	kg/Fahrzeug	[KTBL 2004a]
Anhänger Stahl, niedriglegiert	43	MJ/kg	[Waltjen 1999]
Gesamtfahrleistung	100000	km	(Schätzung)
PEI Anhänger	107500	MJ/	
PE Bedard Anhänger/km	1,075	MJ/km	
PE Bedard Anhänger/km/Mg	0,134375	MJ/km/Mg	

3.3.6 Traktor D 200 leicht zur Güterbef. im Straßenverkehr GEMIS

Spez. Verbrauch	10,52	MJ/km	
Fahrzeugmasse	4000	kg/Fahrzeug	
Stahl, niedriglegiert	43	MJ/kg	[Waltjen1999]
Fahrleistung	8000	km/Jahr	
Lebensdauer	12	Jahre	
Gesamtfahrleistung	96000	km	
PEI Fahrzeug	172000	MJ	
PE Bedarf Fahrzeug/km	1,792	MJ/km	

3.4 Strohballen pressen (Prozesse 1. und 2. Ordnung)

Fall	Menge (Mg/ha)	Arbeitsbreite (m)	Leistung (ha/h)	Herst. PE Bed. Schlepper MJ/h	Herst. PE Bed. Schlepper MJ/Mg Stroh
HD ungünstig	4	2,75	0,9	16,039	4,455
HD günstig	5	4,15	0,74	16,039	4,335
Q ungünstig	4	5,6	4,05	31,803	1,963
Q günstig	5	8	6,98	31,803	0,911

Bei "Stroh als Hauptprodukt…" entspricht der Dieselbedarf dem kompletten Bedarf des für den Anbau benötigten Treibstoffes. Alle Daten aus [KTBL]

Fall (Fortsetzung)	Menge Mg/ha	Dieselbed. Presse l/ha	Dieselbedarf l/Mg	Maschinenher-stellung (Presse+ Schlepper) (MJ/Mg)	PEI MJ/Mg
HD ungünstig	4	9,5	2,375	15,014	160,248
HD günstig	5	11	2,2	14,894	149,426
Q ungünstig	2,5	4	1,6	5,076	102,918
Q günstig	5	3,02	0,604	4,024	40,960

Stroh Hauptprodukt aus öklologischem Anbau	5	92	18,4	4,024	1129,202

Bei "Stroh als Hauptprodukt…" entspricht der Dieselbedarf dem kompletten Bedarf des für den Anbau benötigten Treibstoffes. Alle Daten aus [KTBL 2004a]

3.5 Bindegarn

Pro Tonne Stroh werden in allen Fällen 1,2 kg Bindegarn benötigt [KTBL1]. Der PEI von Garn aus
75,6 MJ/Mg Strohballen

Fall	Ballengewicht (Mg)	Garnverbrauch Ballen (kg/Ballen	Garnverbrauch (kg/mg Stroh)	PEI Polyamidgarn (MJ/kg) 1	PE Bed. Polyamidgarn (MJ/Mg Stroh)
HD ungünstig			1,1	63,000	69,300
HD günstig			1,1	63,000	69,300
Q ungünstig	0,255	0,3	1,176470588	63,000	74,118
Q günstig	0,255	0,3	1,176470588	63,000	74,118

1: Waaltjen (1999)

3.6 Laden der Ballen und Transport zum Hof (Quaderballen)

Fall	Menge (Mg/ha)	Leistung (ha/h)	Hers. PE Bed. Frontlader (MJ/Mg)	Herst. PE Bed. Hänger MJ/Mg	Herst. PE Bed. Schlepper MJ/Mg Stroh
Q ungünstig	4	3,57	1,12	1,075	2,198
Q günstig	5	3,03	1,06	0,269	1,327

Fall (Fortsetzung)	Menge Mg/ha	Dieselbed. Lader l/ha	Dieselbedarf MJ/Mg	PE Bedarf Herstellung Lader (MJ/ha)	Laden+ Transp. PE Bed. MJ/Mg
Q ungünstig	4	2,2	33,63301765	2,198	35,831
Q günstig	5	2,1	25,68339529	1,327	27,011

Alle Daten aus [KTBL1]

3.7 Ballentransport mit landwirtschaftlichem Zug (Traktor und zwei Anhänger) (für Kleinballen)

3.7.1 PE Bedarf Traktor + Anhänger

Diesel	10,52	MJ/km
Herst. Schlepper	1,792	MJ/km
Herst. Anhänger	1,075	MJ/km
Herst. Anhänger	1,075	MJ/km
Summe	14,462	MJ/km
Spez. Verbrauch	**0,904**	**MJ/(km*Mg)**
Davon Herstellungsenergie	0,246	MJ/(km*Mg)

3.7.2 Ballentransport zum Hof

Fall	Anzahl km	Spez. Verbrauch MJ/(km*Mg)	Primärenergie bed. (MJ/Mg)	Anteil Herst.-energie Traktor und Anhänger (MJ/Mg)
HD ungünstig	8	0,904	7,231	1,971
HD günstig	2	0,904	1,808	0,493
nicht anderweitig gekennzeichnete Daten aus [Gemis]				

3.8 Anteiliger PE zur Herstellung d. Maschinen

Szenario/ [MJ/Mg] Teilverbrauch	HD-Ballen günstig	HD-Ballen ungünstig	Q-Ballen günstig	Q-Ballen ungünstig
Schlepper und Ballenpresse	14,894	15,014	4,024	5,076
Transport zum Hof, (Laden und Entladen der Ballen mit Frontlader)	0,493	1,971	1,327	2,198
Summe (MJ/Mg)	15,386	16,985	5,352	7,274
Summe (kWh/Mg)	4,274	4,718	1,487	2,021
Anteil am Gesamt PEI (%):	6,977	7,173	3,767	3,417

4. Vergleich mit früheren Untersuchungen

	Krick HD-Ballen	**Krick Q-Ballen**	**Hoffmeister**
PEI (kWh/Mg)	63	50	32
PEI (MJ/Mg)	227	180	115
PEI (kWh/m³)	6,9	6,9	kA
PEI (MJ/m³)	24,9	24,8	kA
Ballenart	Quaderballen	Hochdruckbal	kA
Ballendichte (kg/m³)	110	138	kA

Bigland-Pritchard		
PEI für Pressen von 400 Ballen	0,34	GJ
Angenommene Ballendichte	100	kg/m³
Angenommene Ballenlänge	0,9	m
Angenommene Ballenhöhe	0,36	m
Angenommene Ballenbreite	0,48	m
Strohvolumen von 400 Ballen (m³)	62,208	m³
PEI für Pressen	5,5	MJ/m³
PEI für Pressen	1,5	kWh/m³
Strohmasse von 400 Ballen	6,2208	Mg
PEI für Pressen	54,7	MJ/Mg
PEI für Pressen	15,2	kWh/Mg

Krick		
Nur Ballen pressen (HD-B. günstig)	134,532	MJ/Mg
PEI nur Pressen (HD-B. günstig)	37,4	kWh/Mg

Anhang I.5: Zum Stand der Forschung zur Wärmeleitfähigkeit von Stroh

In diesem Anhang werden Testergebnisse aus den USA, Kanada, Österreich und Deutschland aufgeführt. Dabei werden zunächst Tests an Strohproben, dann Tests an Strohballen und Tests an Strohballenwänden dargestellt.

1 Wimmer et. al. 2001: Tests an Strohproben

Die Untersuchungen wurden im Rahmen der wirtschaftsbezogenen Grundlagenstudie der Gruppe angepasste Technologien (GrAT) „Wandsysteme aus nachwachsenden Rohstoffen“ der Programmlinie „Haus der Zukunft“ des österreichischen Ministeriums Verkehr, Innovation und Technologie erstellt und von der Forschungsanstalt MPA 39, Wien durchgeführt. Die Prüfungen wurden nach Ö-Norm B6015 und nach EU-Normbedingungen durchgeführt. Die Prüfkörper hatten Abmessungen von ca. 0,5x0,5x0,1 m. Verwendet wurde Weizenstroh, welches gemäß ÖNORM in einer Trockenkammer bis zur Massekonstanz (Ausgleichsfeuchte) gelagert wurde. Das Stroh wurde in einen Holzrahmen eingebracht. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Halme dabei überwiegend gegen die Wärmestromrichtung orientiert wurden. Beim Test nach EU-Norm wurde mit unterschiedlichen Probenmitteltemperaturen getestet. Die Ergebnisse der Tests nach ÖNORM zeigen, dass die Wärmeleitfähigkeit mit der Dichte abnimmt. Die Testergebnisse nach EU-Norm zeigen, dass die Wärmeleitfähigkeit mit steigender Temperatur zunimmt.

Tabelle 1.1: Ergebnisse der Tests nach ÖNORM B6015 (vgl. Wimmer et. Al. 2001)

Test	Orientierung	P.dicke b (m)	P.dichte ρ (kg/m³)	Temperaturdiff. (K)	W-Leitfähigkeit $\lambda_{10,tr}$ (W/(mK)) Prüfw.	W-Leitfähigkeit λ (W/(mK)) Rechenw.
Wimmer et. al. 1		0,1265	73	10,6-11,1	0,0369	0,0443
Wimmer et. al. 2		0,1128	83,8	10,6-11,1	0,0337	0,0404

Tabelle 1.2: Ergebnisse der Tests nach EU-Norm (vgl. Wimmer et. Al. 2001)

Test	Orientierung	P.dicke b (m)	P.dichte ρ (kg/m³)	Temperaturdiff. (K)	W-Leitfähigkeit $\lambda_{10,tr}$ (W/(mK)) Prüfw.	W-Leitfähigkeit λ (W/(mK)) Rechenw.
Wimmer et. al. 3		0,106	100,8	10	0,0380	0,0456
Wimmer et. al. 4		0,106	100,8	19,5	0,0394	0,0456
Wimmer et. al. 5		0,106	100,8	28,7	0,0408	0,0456

2 FASBA 2003: Tests an Strohproben

Die Untersuchungen wurden vom Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V. in Auftrag gegeben und vom FIW München durchgeführt.
Die Prüfungen wurden nach DIN 52612 durchgeführt. Trocknung bei 70°C bis zur Massekonstanz (Ausgleichsfeuchte). Das Stroh wurde in einen Holzrahmen eingebracht. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Halme dabei überwiegend gegen die Wärmestromrichtung orientiert wurden. Beim Test nach EU-Norm wurde mit unterschiedlichen Probenmitteltemperaturen getestet. Auch hier nimmt die Wärmeleitfähigkeit mit der Ballenmitteltemperatur zu.

Tabelle 2.1: FASBA 2003

Test	Orien-tierung	P.dicke b (m)	P.dichte ρ (kg/m³)	Tempera-turdiff. (K)	W-Leitfähig-keit $\lambda_{10,tr}$ (W/(mK)) Prüfw.	W-Leitfähig-keit λ (W/(mK)) Rechenw.
FASBA 1		0,10	90	10,6	0,0380	0,045
FASBA 2		0,10	90	23,5	0,0401	
FASBA 3		0,10	90	36,8	0,0419	

3 DIBt 2006: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung

Am 10. Februar 2006 erteilte das Deutsche Institut für Bautechnik auf Antrag des FASBA die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung AbZ Z-23.11-1595 für Baustrohballen mit bestimmten Eigenschaften für eine bestimmte Einbausituation.
In dieser Zulassung werden einerseits für die laufende Baustoffkontrolle maximale Messwerte für z.B. Dichte, Feuchte und Wärmeleitfähigkeit, andererseits Bemessungswerte festgelegt, welche auszugsweise in Tabelle 3.1 aufgeführt sind. Die maximal zulässige Wärmeleitfähigkeit in Faserrichtung ist höher als jene senkrecht zur Faserrichtung.

Tabelle 3.1: DIBt 2006

Test	Orien-tierung	P.dicke b (m)	P.dichte ρ (kg/m³)	Tempera-turdiff. (K)	W-Leitfähig-keit $\lambda_{10,tr}$ (W/(mK)) Prüfw.	W-Leitfähig-keit λ (W/(mK)) Rechenw.
Baustrohballen 1		0,28; 0,35; 0,48	90-110	10	0,067	0,080
Baustrohballen 2		0,38; 0,46; 0,85	90-110	10	0,044	0,052

4 McCabe (1994): Tests an Strohballen

Getestet wurden drei unterschiedliche 3-string Ballen aus Reis- bzw. Weizenstroh. Relative Feuchte: 8,4%. Die Anzahl wird nicht erwähnt. Zur Anwendung kam ein Wärmeplattenverfahren. Es wurde eine höhere Wärmeleitfähigkeit bei Wärmestrom in Halmrichtung als bei Wärmestrom senkrecht zur Halmrichtung registriert.
Es bestätigt sich die positive Abhängigkeit zwischen Wärmeleitfähigkeit und Temperaturdifferenz (Zitiert in Stone 2003: 4f, BuildingGreen (Online 28.06.2007), Wimmer et. al. 2001: 77).

Tabelle 4.1: Tests McCabe 1994 (vgl. BuildingGreen 2007)

Test	Orien-tierung	B.dicke b (m)	B.dichte ρ (kg/m³)	Temperatur-differenz (K)	R-Wert (mK/W)	R-Wert total (m²K/W)	W-Leitfähig-keit λ (W/(mK))
McCabe 1		0,58	133	9,4	16,5	9.7	0,061
McCabe 2		0.42	133	19,2	20,5	8,6	0,059
McCabe 3		0,42	133	10,9	21,8	9,7	0,046

5 Acton (1994): Tests an Strohballen

Getestet wurden drei 2-string Ballen flach liegend aus Weizenstroh, Strohfeuchte: 4-5%. Die Temperaturdifferenz wird nicht erwähnt. Die Messung erfolgte mit einer Wärmesonde (Zitiert in Stone 2003: 5, BuildingGreen (Online 28.06.2007)), Wimmer et. al. 2001: 77).

Tabelle 5.1: Tests Acton 1994 (vgl. BuildingGreen 2007)

Test	Orien-tierung	B.dicke b (m)	B.dichte ρ (kg/m³)	Temperatur-differenz (K)	R-Wert (mK/W)	R-Wert total (m²K/W)	W-Leitfähig-keit λ (W/(mK))
Acton		0,46	76-87	k.A.	16,9-20	7,7-9,2	0,059-0,05

6 Ashour (2003): Tests an Strohballen

Tests an Weizen- und Gerstenstrohproben bei 8 verschiedenen Dichten zwischen 82 und 138 kg/m³ bei Weizen- bzw. 68 und 98 kg/m³ bei Gerstenproben gemessen bei drei verschiedenen Temperaturen (wo diese Temperaturen gemessen wurden, wird nicht klar): 10,2 Weizen/ 9,3 Gerste; 20,7 und 34,2 °C. Das genaue Testsetup wird aus der Beschreibung nicht klar. Wärmestrom vermutlich in Halmrichtung.

Ergebnisse:

- Die Wärmeleitfähigkeit λ steigt mit steigender Temperatur.
- Die Wärmeleitfähigkeit λ sinkt zunächst mit steigender Dichte, stabilisiert sich und steigt dann mit steigender Dichte.
- Die Wärmeleitfähigkeit λ der Weizenproben ist höher als jene der Gerstenproben. Ashour führt dies auf den höheren Anteil an kleinen Strohpartikeln in den Gerstenproben zurück.
- Die Wärmeleitfähigkeit schwankte bei den Weizenproben zwischen 0,03 W/(mK) bei ρ= 113 kg/m³, t= 10,3°C und 0,118 W/(mK) bei ρ= 82 kg/m³, t= 34,2°C
- und zwischen 0,03 W/(mK) bei ρ= 68-98 kg/m³, t= 9,6°C und 0,94 W/(mK) bei ρ= 69 kg/m³, t= 34,2°C

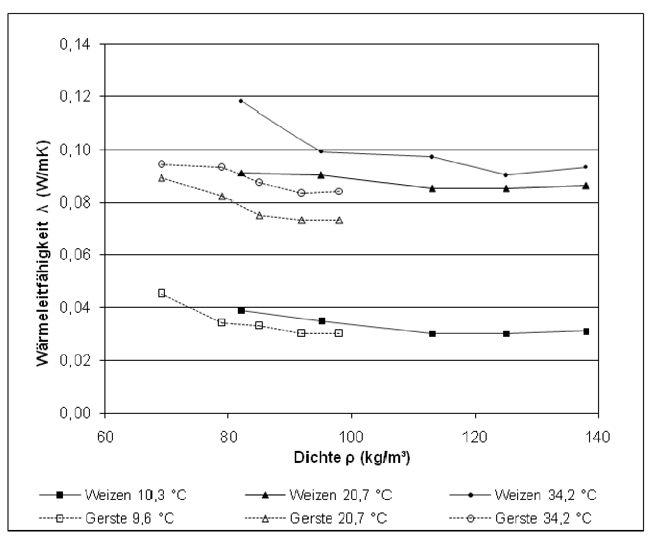


Abbildung 6.1: Wärmeleitfähigkeit von Weizen- und Gerstenstroh in Abhängigkeit von der Dichte (Daten vgl. Ashour 2003: 234, 242)

Zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit λ in Abhängigkeit von der Ballendichte und der Temperatur ermittelte Ashour (2003: 233) folgende Formeln:

Weizen: $\lambda = 0{,}0399 - 0{,}00023\rho + 0{,}00269t$

Gerste: $\lambda = 0{,}06025 + 0{,}0005\rho + 0{,}002337t$

Dabei ist: λ: Wärmeleitfähigkeit (W/(mK))
ρ: Ballendichte (kg/m³)
t: Temperatur (°C)

7 Watts et. al. (1995): Tests an einer beidseitig verputzten Strohballenwand

Getestet wurde eine beidseitig verputzte Wand eines bestehenden Hauses an drei Stellen. Die Strohart wird nicht erwähnt, ebenso nicht die Strohballenfeuchte, -dichte und Temperaturdifferenz sowie Putzart und -dicke. Die Messung erfolgte mit einem Heizkastenverfahren. Die Ergebnisse wurden aus den Durchschnittswerten der drei Messstellen ermittelt (Zitiert in Stone 2003: 5).

Tabelle 7.1: Tests Watts et. al. 1995 (vgl. Stone 2003)

Test	Orien-tierung	B.dicke b (m)	B.dichte ρ (kg/m³)	Temperatur-differenz (K)	R-Wert (mK/W)	R-Wert total (m²K/W)	W-Leitfähig-keit λ (W/(mK))

Watts et. al.		0,47	k.A	k.A.	10,65	4,98	0,094

8 Stone (1997): Tests an beidseitig verputzten Strohballenwänden

Getestet wurden je eine beidseitig verputzte Wand aus flach liegenden und hochkant liegenden 3-string Ballen. Die Strohart wird nicht erwähnt, ebenso nicht die Strohballendichte, Temperaturdifferenz sowie Putzart und -dicke. Die Messung erfolgte mit einem Heizkastenverfahren und musste aus organisatorischen Gründen durchgeführt werden als der Putz noch nicht komplett durchgetrocknet war (Zitiert in Stone 2003: 5). Auch bei Stone ist der Wärmeleitwert in Faserrichtung höher als jener gegen die Faserrichtung.

Tabelle 8.1: Tests Stone 1994 (vgl. Stone 2003)

Test	**Orien-tierung**	**B.dicke b (m)**	**B.dichte ρ (kg/m³)**	**Temperatur-differenz (K)**	**R-Wert (mK/W)**	**R-Wert total (m²K/W)**	**W-Leitfähig-keit λ (W/(mK))**
Stone 1		0,58	k.A	k.A.	7,80	4,98	0,128
Stone 2		0,41	k.A	k.A.	14,23	4,98	0,07

9 ORNL (1998): Tests an beidseitig verputzten Strohballenwänden

Getestet wurden mehrere beidseitig verputzte Wände aus (vermutlich) flach liegenden 2-string Ballen aus Weizen. Die Ballenfeuchte betrug 13%, Ballendichte, Temperaturdifferenz sowie Putzart und –dicke werden nicht erwähnt. Die Messung erfolgte mit einem Heizkastenverfahren. Die aufgeführten Werte stellen die Mittelwerte aller Messungen dar (Zitiert in Stone 2003: 5f).

Tabelle 9.1: Tests ORNL 1998 (vgl. Stone 2003)

Test	**Orien-tierung**	**B.dicke b (m)**	**B.dichte ρ (kg/m³)**	**Temperatur-differenz (K)**	**R-Wert (mK/W)**	**R-Wert total (m²K/W)**	**W-Leitfähig-keit λ (W/(mK))**
ORNL		0,48	k.A	k.A.	9,99	4,82	0,100

10 FASBA (2006): Test an beidseitig verputztem Strohballenelement

Getestet wurden ein beidseitig mit Lehm (ρ= 2000 kg/m³, Schichtdicke 19 mm, λ= 1,0 W/(mK)) verputztes Strohballenelement aus hochkant liegenden HD-Ballen. Die Strohart und die Ballenfeuchte sind nicht dokumentiert. Die Messung erfolgte mit einem Heizkastenverfahren nach DIN EN 1934.

Tabelle 10.1: FASBA (2006)

Test	**Orien-tierung**	**B.dicke b (m)**	**B.dichte ρ (kg/m³)**	**Tempera-turdiff. (K)**	**R-Wert total (m²K/W)**	**U-Wert (W/m²K)**	**W-Leitfähig-keit $\lambda_{10,tr}$ (W/(mK))**
FASBA 2006		0,36	98,8	18,02	5,45	0,178	0,072

Anhang II.1: Zum Stand der Forschung zum elastomechanischen Verhalten von Strohballen und Strohballenwänden

Inhalt

Es existiert ein Vielzahl von Untersuchungen zum elastomechanischen Verhalten von Strohballen und Strohballenwänden, die vor allem in den Vereinigten Staaten von Amerika und Kanada durchgeführt wurden. Aus dem deutschsprachigen Raum sind lediglich die Arbeiten von Schmidt 2003, Ashour 2003 und Danielewicz/Reinschmidt 2007 bekannt. In einigen Fällen liegen nur unvollständige Informationen zu Testergebnissen und zu Materialien und Methoden vor. Dies erschwert ein Nachvollziehen und Vergleichen der Versuchsergebnisse.
In diesem Anhang werden die Ergebnisse in Europa, Australien und Amerika durchgeführter Tests zum elastomechanischen Verhalten von Strohballen zusammenfassend dargestellt. Dabei wird auf folgende Arbeiten eingegangen:

1. Bou Ali 1993: „Straw Bales and Straw-Bale Wall Systems“. In dieser, an der University of Arizona entstandenen Masterarbeit, wird das Verhalten von Strohballen und Strohballenwänden unter Belastung untersucht.
2. Thompson/Watts/Wilkie/Corson 1995: “Thermal and Mechanical Properties of Straw Bales As They Related to a Straw House”: Gegenstand der Untersuchungen war das elastomechanische Verhalten von flach liegenden Weizen-, Hafer- und Gersteballen.
3. Grandsaert 1999: „A Compression Test of Plastered Straw-Bale Walls“ Master Thesis, University of Colorado at Boulder, USA. Es wurden jeweils drei Wände mit 3 unterschiedlichen Wandaufbauten getestet.
4. Stephens/Bundinger 2000: Stephens, Don and Budinger & Associates Inc., laboratory Test: Versuche mit Höchstdruckballen.
5. Zhang: 2000: “Load-Carrying Characteristics of a Single Straw Bale Under Compression”, 2002: “A Pilot Study examining and comparing the load bearing capacity and behaviour of an eart rendered straw bale wall to cement rendered straw bale wall”, 2005: “Preliminary Discussion of Bale on Edge Wall Test” Elastomechanische Untersuchungen an verputzten und unverputzten Einzelballen, flach- und hochkant liegend, sowie an verputzten Wänden.
6. Smith 2003: “Creep in Bale Walls”: Untersucht wurde das Kriechverhalten von Wandelementen unter Dauerlast.
7. Ashour 2003: “The use of renewable agricultural by-products as bulding materials”. In dieser Dissertation, die auch an der FAL Braunschweig bearbeitet wurde, beschäftigt sich der Autor mit der Untersuchung von Strohballen hinsichtlich der Verwendung für Bauten in Ägypten. Es wurden Untersuchungen zum hygroskopischen, elastomechanischen und thermischen Verhalten von Weizen- und Gerstenstrohballen durchgeführt.
8. Schmidt 2003: “Strohballendruckversuche”: Untersuchungen an Quader- und Kleinballen.
9. Vardy/MacDougall 2006: „Compressive Testing ad Analysis of Plastered Straw Bales”: Untersuchungen an verputzten Ballen unterschiedlicher Ausrichtung und Putzstärken.
10. Danielewicz/Reinschmidt 2007: „Lastversuche mit großen Quaderballen an der Hochschule Magdeburg - Stendal". Untersucht wurde das Verhalten von flach liegenden Quaderballen und Wänden aus Quaderballen in flach liegender Orientierung.

1 Bou-Ali 1993: „Straw Bales and Straw-Bale Wall Systems“

Untersucht wurde das elastomechanische Verhalten von Strohballen und Wänden aus Strohballen im Rahmen einer Masterarbeit an der Universität von Arizona.

1.1 Material

Zur Anwendung kamen 3-string Ballen aus Weizenstroh. Die durchschnittliche Ballenrohdichte betrug $\rho = 136$ kg/m³, die durchschnittlichen Abmessungen 0,42x0,58x1,16 m. Die Ballenfeuchte ist nicht dokumentiert.

1.2 Ergebnisse

1.2.1 Einzelballen

Unter langsam steigender Last wurden Spannung und Kraft bis zum Versagen des Ballens aufgezeichnet. Das Versagen der Ballen ist nicht eindeutig definiert. Auf diese Weise wurden 4 Ballen flach liegend und 2 Ballen hochkant liegend getestet.
Es wurde festgehalten:
- Das Ballengarn riss bei flach liegenden Ballen nicht.
- Das Ballengarn riss bei hochkant liegenden Ballen.
- Hochkant liegende Ballen sind deutlich weicher als flach liegende [Im Bereich bis

ca. 60 kN/m² weisen hochkant liegende Ballen jedoch ähnliche oder bessere Werte verglichen mit flach liegenden Ballen auf, Anm. d. Vf.]

Folgende Punkte beziehen sich auf flach liegende Ballen
- Es gab keinen Punkt plötzlicher Stauchungsänderung vergleichbar mit dem Brechen eines Steins.
- Mit steigender Last wurden die Ballen steifer (Abbildung 1.1).
- Es wurde eine annähernd lineare Beziehung zwischen horizontaler und vertikaler Stauchung im Testbereich festgestellt. Die Poisson-Zahl liegt bei 0,3 +/- 0,02 [sic. Gemeint ist vermutlich die Querkontraktionszahl μ. Die Poisson-Zahl m läge dann zwischen 3,3 und 50 Anm. d. Vf.]
- Mit steigender Dichte nimmt die Steifigkeit der Ballen zu (Abbildung 1.2) (vgl. Bou-Ali 1993: 41ff).

Es muss festgehalten werden, dass sich anhand der in der Thesis enthaltenen Daten nicht alle Ergebnisse der Thesis nachvollziehen lassen. Nicht nachvollziehbar sind beispielsweise die auf Seite 49 genannten Dichten, insbesondere die hohe Dichte des Bale #1, die den Angaben auf Seite 41 widersprechen. Die Ballendichte von Ballen #1 von 195 kg/m³ wird vom Autor der vorliegenden Dissertation angezweifelt. Sehr hoch fallen auch die Spannungs-Dehnungs-Werte aus.

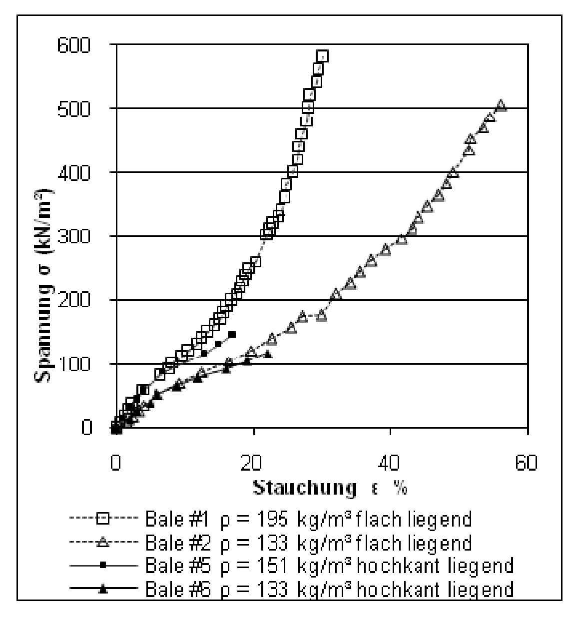


Abbildung 1.1: Spannungs-Stauchungs-Diagramm flach und hochkant liegender Ballen (Daten aus Bou-Ali 1993: Anhang A [die Spannung für die flach liegenden Ballen wurde aus den Last (lbs) und den Ballenabmessungen (in) neu ermittelt, Anm.d.Vf.])

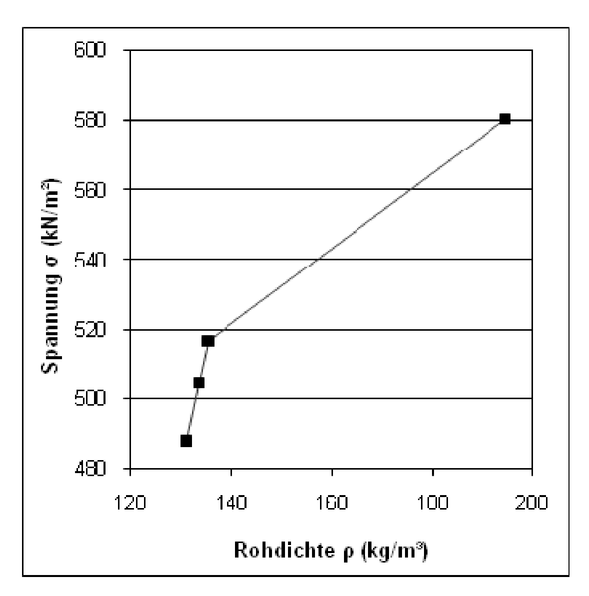


Abbildung 1.2: Maximalspannung in Abhängigkeit von der Ballendichte (eigene Darstellung, Daten aus Bou-Ali 1993: 49)

1.2.2 Wände

Wände wurden vertikal und horizontal in und senkrecht zur Wandebene belastet.
Es wurden insgesamt 9 Wände, bestehend aus flach liegenden Weizenballen, getestet. Die Strohballen wurden mit Stahlstäben im Abstand von 2 Fuß (an den Wandenden 1 Fuß) miteinander verbunden. Die Wandhöhe betrug 1,63 m, die Wandlänge 2,46 m und die Wanddicke 0,58 m. Die Dichten der Wände sind in der Arbeit nicht dokumentiert.

Tests mit vertikaler Last (3 Testwände)
(Abbildung 1.3)
- Es wurden drei Wände getestet.
- Belastet wurde bis 71 kN, entsprechend ca. 50 kN/m².
- Bei einer Wand wurde bei 50 kN/m² ein Ausbeulen beobachtet.
- Alle Wände hielten der Belastung stand.
- Die Spannungs-Stauchungs-Kennlinien von Wänden verlaufen nicht analog zu denen von Einzelballen.
- Die Steifigkeit der Wand nimmt mit zunehmender Last ab.
- Die Kriechverformung wurde dokumentiert. Sie betrug nach 5 Wochen ca. 6 mm und kam dann zum Stillstand

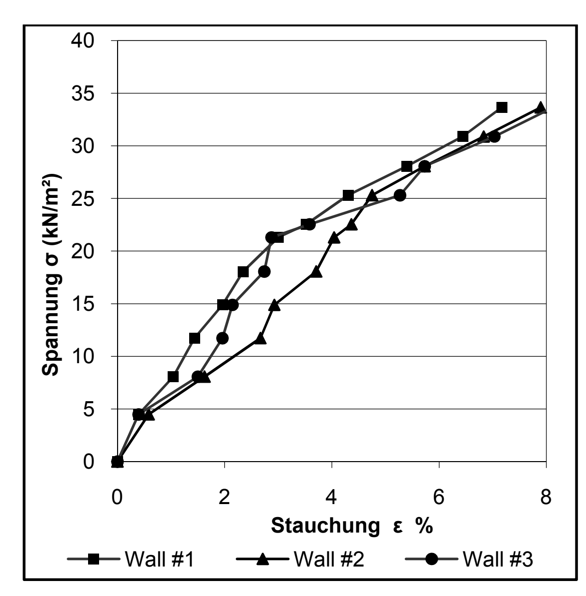


Abbildung 1.3: Spannungs-Stauchungs-Diagramm vertikal belasteter Wände aus flach liegenden Strohballen (eigene Darstellung, Daten aus Bou-Ali 1993: Anhang C)

Horizontal belastete Wände (6 Testwände)
*Belastung senkrecht zur Wandebene („Out-of-Plane Lateral", 3 Testwände) (*Abbildung 1.4*)*

- Test:
  - Simuliert wurde eine Windbelastung von 100 mph (Meilen pro Stunde, entsprechend 161 km/h). Dies entspricht einem Winddruck von 1,1 kN/m².
  - Es wurden Sperrholzplatten auf der „windabgewandten" Seite der Wand platziert. An diesen wurden Zugelemente befestigt, die durch die Wand geführt und unter Spannung gesetzt wurden.
- Ergebnisse:
  - Unter der Belastung von 1,23 kN/m² wurde eine spontane Verformung der Wand um maximal 25,4 mm beobachtet.
  - Nach 18 Stunden betrug die Kriechverformung 1,6 mm
  - Eine weitere Verformung war nicht messbar (vgl. Bou-Ali 1993: 39,63,89).

Belastung in der Wandebene *(3 Testwände) („In-Plane Lateral", 3 Testw.) (*Abbildung 1.5*)*

- Test:
  - Simuliert wurde eine Windbelastung von 100 mph (Meilen pro Stunde, entsprechend 161 km/h) auf eine senkrecht zur Wand stehende Fläche von 3,3 m². Dies entspricht einem Winddruck von 9,5 kN.
  - Die betrachtete Wand dient also zur Aussteifung der windbelasteten Fläche.
  - Die Last wurde über eine Sperrholzplatte eingeleitet.
- Ergebnisse:
  - Unter der Belastung von 9,5 kN wurde eine spontane Verformung der Wand um maximal 152 mm beobachtet.
  - Nach 24 Stunden betrug die Kriechverformung 25,4 mm
  - Eine weitere Verformung war nicht messbar (vgl. Bou-Ali 1993: 40,66,91).

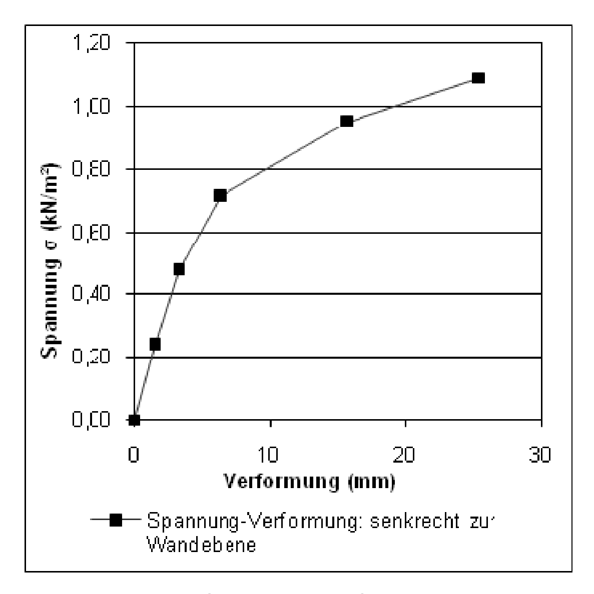


Abbildung 1.4: Spannung-Verformung: senkrecht zur Wandebene (eigene Darstellung, Daten aus Bou-Ali 1993: 89)

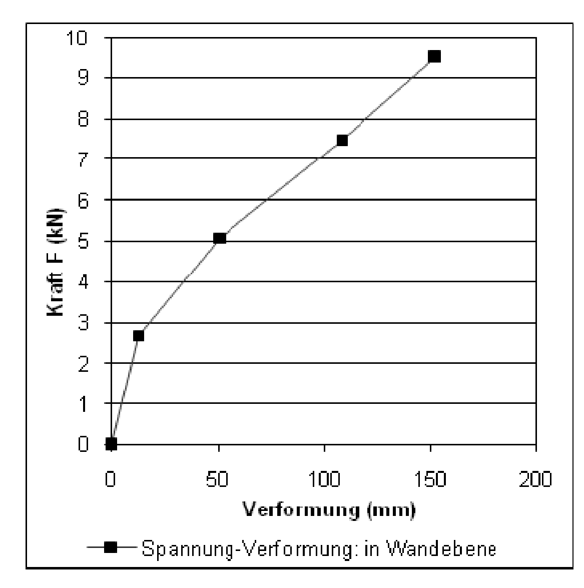


Abbildung 1.5: Spannung-Verformung: in der Wandebene (eigene Darstellung, Daten aus Bou-Ali 2003: 91)

2 Thompson/Watts/Wilkie/Corson 1995: "Thermal and Mechanical Properties of Straw Bales As They Related to a Straw House"

Untersucht wurden je sechs flach liegende, unverputzte Ballen aus Weizen-, Hafer- und Gerstenstroh mit einem durchschnittlichen Feuchtegehalt von 9%.
Belastet wurde mit einer Spannung von bis zu 69 kN/m². Die Elastizitätsmodule lagen zwischen 124 und 179 kN/m², errechnet zwischen Koordinatennullpunkt und maximaler Spannung. Es wurden durchschnittliche Poisson-Zahlen von 0,37 (in Ballenlängsrichtung) und 0,11 (in Ballenquerrichtung) errechnet [sic. Gemeint ist vermutlich die Querkontraktionszahl μ. Die Poisson-Zahl m läge dann zwischen 3,3 und 50 Anm. d. Vf.].

Die Autoren beobachteten:
- Es gibt signifikante Schwankungen im Elastizitätsmodul zwischen und innerhalb der einzelnen Ballensorten.
- Die Ballendichte hat einen größeren Effekt auf das Stauchungsverhalten als die Ballensorte [Die Quelle nennt jedoch keine Ballendichten, Anm. d. Vf.].
- Der Elastizitätsmodul nimmt bei steigender Feuchte ab.
- Die Poisson-Zahl ist in Ballenlängsrichtung deutlich höher als in Ballenquerrichtung (Thompson et.al.:1995, zitiert nach King: 2003: 5).

3 Grandsaert 1999: „A Compression Test of Plastered Straw-Bale Walls“

Im Rahmen dieser Master Thesis an der University of Colorado at Boulder, USA wurden jeweils drei Wände mit 3 unterschiedlichen Wandaufbauten getestet.

3.1 Material und Tests

3.1.1 Strohballen, Putz

Strohballen: Verwendet wurden Gersteballen aus dem Tal von San Luis. Sie wurden in der Abenddämmerung mit Freemann Ballenpressen hergestellt. Die Ballen wurden über den Winter eingelagert, wobei die 3-string Ballen in Plastik verpackt waren, die 2-string Bales nicht (Grandsaert 1999: 12).
Tabelle 3.1 zeigt die Balleneigenschaften. Gelistet sind Durchschnittswerte aus 5 zufällig ausgewählten 2-string und 10 zufällig ausgewählten 3-string Ballen (Einheiten im Original: in, lb, lb/ft², Trockendichte: eigene Berechnung):

Tabelle 3.1: Durchschnittliche Balleneigenschaften (Daten aus Grandsaert 1999: 12)

Ballenart	Abmessungen (cm)	Masse m (kg)	Trockendichte ρ_{tr} (kg/m³)	Feuchte (%)
2-str.	36,8x46 x97,3	25,3	126,1	17,9
3-str.	37,3x59 x115	37,2	126,3	14,5

Putz: Für die erste Putzlage wurde ein Kalkzementputz im Mischungsverhältnis Zement:Kalk:Sand von 1:1:4 verwendet. Druckfestigkeitstests zeigten eine durchschnittliche Druckfestigkeit von 9,9 MN/m² für den armierten und 8,3 MN/m² für den nicht armierten Putz. Für die zweite Putzlage wurde ein Kalkzementputz im Mischungsverhältnis Zement:Kalk:Sand von 1:1:4,5 verwendet. Druckfestigkeitstests zeigten eine durchschnittliche Druckfestigkeit von 7,9 MN/m² für den armierten und 6,5 MN/m² für den nicht armierten Putz (vgl. Grandsaert 1999: 13).

3.1.2 Wandaufbauten

Es wurden insgesamt neun Wände in 3 unterschiedlichen Wandaufbauten getestet:

Wandaufbau 1: Wandaufbau 1 stellte die Referenzvariante dar. Die Wände (Höhe: 2,44 m, Breite: 0,854 m, Länge: 3,94 m) wurden auf Lagerhölzern aufgebaut und bestanden aus 6 im Verband verlegten Lagen 3-String Ballen. Eine Lage bestand aus 3 Ballen. Ballennägel und Fundamentanker wurden nicht verwendet. Nach dem Aufbringen einer Vorspannung wurden die Wände mit einem polypropylenfaserarmierten Zementputz von 25 mm per Hand verputzt. Eine weitere 25 mm starke Putzlage folgte 96 Stunden später. Die Last wurde über einen Kastenträger[1] eingeleitet. Der Putz wurde indirekt belastet und war oben seitlich über den Kastenträger gezogen. Am Wandfuß stand der Putz auf einer Seite auf den Lagerhölzern auf, auf der anderen war er über die Lagerhölzer gezogen (Grandsaert 1999: 7ff).

[1] Verwindungssteifes Element zusammengesetzt aus Kanthölzern und Holzwerkstoffplatten. Bildet den oberen Abschluss einer Wand und dient zur Verteilung der vertikalen Lasten

Wandaufbau 2: In Abweichung von Wandaufbau 1 wurde in den Putz anstatt der Polypropylenfasern ein Polypropylennetz eingelegt und mit Rasenklammern („sod staples“) arretiert (Grandsaert 1999: 8, 10).
Wandaufbau 3: Wie Wandaufbau 1, jedoch wurden 2- anstatt 3-string Ballen verwendet (Breite: 0,48 m). Eine Ballenlage bestand aus 4 Ballen (Grandsaert 1999: 8, 11).

3.2 *Ergebnisse*

Tabelle 3.2 gibt die durchschnittlichen Werte für die Maximalkraft (maximale aufgebrachte Kraft, Originaleinheit: psi), Maximalspannung (Spannung bei Maximalkraft, durch den Vf. errechnet aus der Maximalkraft und der Fläche), die Maximalstauchung (bei Maximalspannung, Originaleinheit: Δl/l) und den E-Modul (Originaleinheit: ksi. Auf welchen Teil der Kennlinie sich der E-Modul bezieht ist unbekannt) für die unterschiedlichen Wandaufbauten wieder. Abbildung 3.1 zeigt die Last-Stauchungskennlinien der Wände.

Tabelle 3.2: Übersicht der Ergebnisse aus Grandsearts Tests an Strohballenwänden

Wand-aufbau	**Maximal-kraft** (kN)	σ_{max} (kN/m²)	ε_{max} (%)	**E-Modul** (MN/m²)
1	172,9	75,1	0,939	28,68
2	205,0	89,1	0,469	47,84
3	328,6	173,8	0,417	88,94

Als Hauptursachen für das Versagen der Wände identifiziert Grandseart (1999: 35):
- Abscheren des Putzes vom Boxbeam,
- Lokales Beulen des Putzes,
- Globales Beulen,
- Abscheren des Putzes.

Faserarmierung oder Putzgitter? Es wurde festgestellt, dass die faserarmierten Wände insgesamt stabiler waren. Dies wird darauf zurückgeführt, dass sich der faserarmierte Putz besser mit den Strohballen verbindet (das Netz behindert das Eindringen des Putzes in den Strohballen) (Grandsaert 1999: 35f).

2- oder 3string Ballen? Die Wände aus 2-string Ballen schnitten klar besser ab als jene aus 3-string Ballen. Grandsaert (1999: 36) gibt folgende Erklärung: Die 2-string Ballen Wände wurden von professionellen Handwerkern verputzt, die sehr viel Erfahrung mit dem Verputzen von Strohballenwänden hatten.

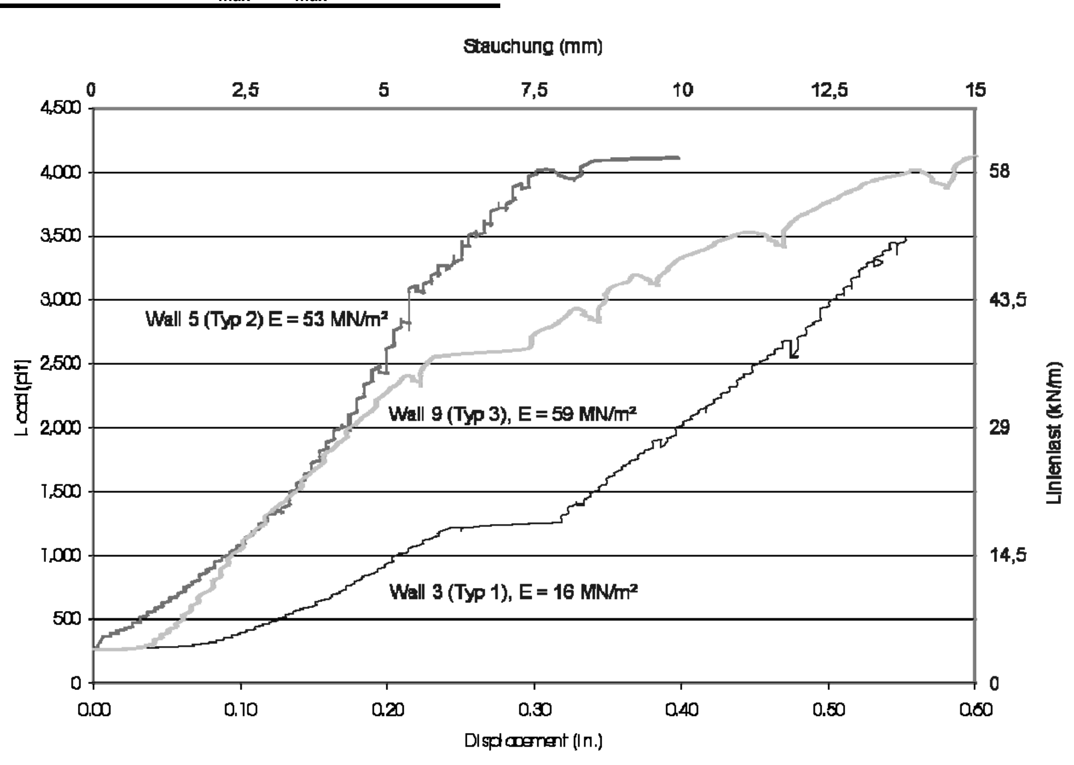


Abbildung 3.1: Kraft-Stauchungs-Diagramm (verändert nach Grandsaert 1999: 3, 24, 27, 33f)

4 Stephens/Bundinger 2000

Die Stephens, Don and Budinger & Associates Inc. führte 2000 Lastversuche mit für den Export bestimmten Höchstdruckballen durch. Verwendet wurden mittels einer Spezialmaschine nachkomprimierte Bluegrass Ballen mit den Abmessungen 0.61x0,61x0,46 m. Die Ballen wurden alle 76 mm mit Polypropylengarn geschnürt. Ihre Dichte betrug ρ = 288 kg/m³. Die Ballen wurden hochkant liegend belastet und zeigten ein lineares Verhalten bis zu einer Spannung von 120 kN/m² bei einer Stauchung von lediglich 13 mm. Der Elastizitätsmodul wurde mit E = 6,84 MN/m² errechnet (Stephens/Budinger 2000, zitiert in King 2005:72).

5 Zhang, 2000, 2002:

Dr. John Zhang untersuchte zwischen 2000 und 2002 mit Michael Faine an der University of Western Sydney, Australien, das elastomechanische Verhalten von Einzelballen und Wandelementen.

5.1 Einzelballen

Im Jahr 2000 wurden im Projekt "Load-Carrying Characteristics of a Single Straw Bale Under Compression" das elastomechanische Verhalten von verputzten und unverputzten Strohballen unterschiedlicher Orientierung untersucht.

5.1.1 Material

Verwendet wurden insgesamt 11 2-String Strohballen mit durchschnittlichen Abmessungen von 0,352x0,462x0,788 m, einer durchschnittliche Masse von 13,4 kg und einer durchschnittlichen Dichte von 102,6 kg/m³ [eigene Berechnung auf Basis der Daten aus Zhang 2000.: 4, Anm. d. Vf.].
Es wurden keine Angaben zu Strohart und Feuchte gemacht.
Getestet wurden: 5 Einzelballen ohne Putz, davon drei flach liegend und zwei hochkant stehend. Drei dieser Ballen wurden zyklisch belastet. 6 Einzelballen mit Putz, davon 3 mit Lehmputz und 3 mit Zementputz. Getestet wurden die Ballen mit aufstehendem Putz, einseitig aufstehendem Putz und nicht aufstehendem Putz.

5.1.2 Testablauf, Beobachtungen, Ergebnisse

Unverputzte Strohballen

Die Ballen wurden in eine Universalprüfmaschine eingebracht und belastet. Kraft und Stauchung wurden aufgezeichnet (Abbildung 5.1). Bei 3 Ballen wurde in drei Zyklen be- und entlastet (Zhang 2000: 4).

Flach liegende Strohballen: Zhang (2000: 5f) identifiziert vier aufeinander folgende Verformungsphasen:
1. Phase: 0-4% Stauchung „initial pre-compaction" – Der Ballen verhält sich „weich", die Spannungs-Stauchungskurve verläuft flach.
2. Phase: 4-12% Stauchung „linear increase" – Signifikantes, lineares Ansteigen der Spannungs-Stauchungskurve, der Ballen wird fester.
3. Phase: 12-37% Stauchung „plastic flow" – Die Spannungs-Stauchungskurve flacht deutlich ab. Zhang geht von einer plastischen Verformung ähnlich dem Verhalten von Stahl bei Überschreiten der Fließgrenze (Lüdersdehnung) aus. Zhang beschreibt auch diesen Abschnitt als "almost perfectly linear".
4. Phase: ab 37% Stauchung „hardening" – erneutes Ansteigen der Kurve, der Strohballen wird beständig steifer.
Zhang hebt hervor, dass es aufgrund des beschriebenen Verhaltens nie zu einem absoluten strukturellen Versagen kommt.
Ein Garnriss, der einem solchen Verhalten entsprechen würde, wurde nicht beobachtet [Anm. d. Vf.).

Hochkant liegende Strohballen: Für hochkant liegende Strohballen beschreibt Zhang ein identisches Verhalten in den Phasen 1-3 zu flach liegenden Ballen. Jedoch verharrt der Ballen im „plastic flow". Zhang (2000: 6f) hebt hervor: „Surprisingly. Both strength and stiffness were slightly higher … [als bei flach liegenden Ballen, Anm. d. Vf.]".

Zyklische Belastung: Unter zyklischer Belastung wurden zwei flach- und ein hochkant liegender Ballen getestet, um den „load memory effect" von Strohballen zu untersuchen. Es wurde festgestellt, dass langsame Lastwechsel keine signifikanten Auswirkungen auf das Verhalten der Strohballen haben (Zhang 2000: 8).

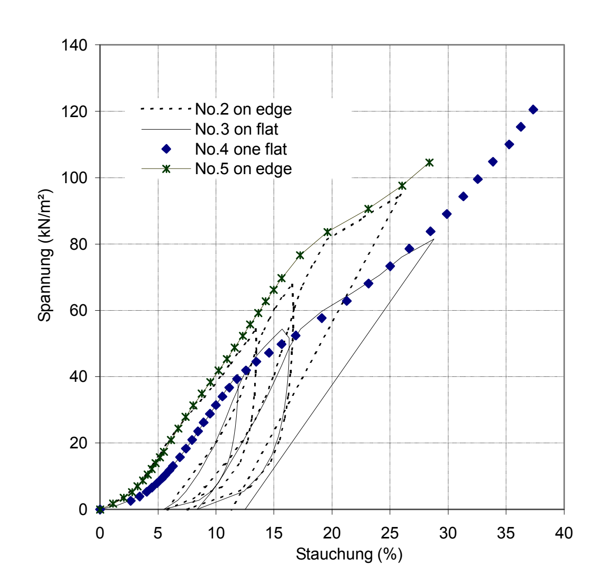


Abbildung 5.1: Spannungs-Stauchungs-Diagramm Kleinballen ohne Lehmputz (verändert nach Zhang 2000: 8)

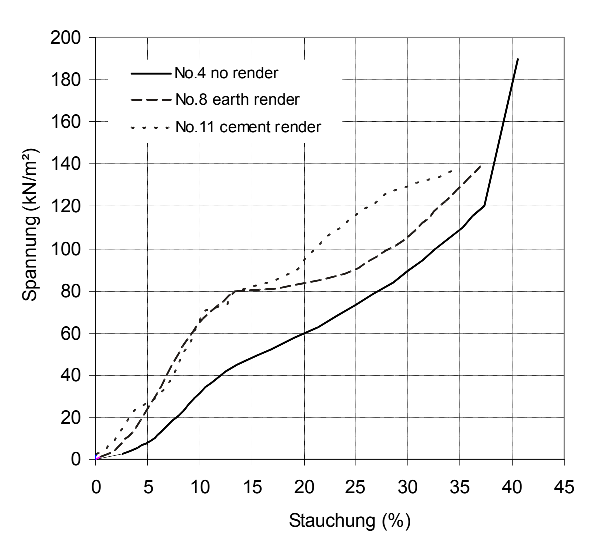


Abbildung 5.2: Spannungs-Stauchung-Diagramm verputzter und unverputzter flach liegender Ballen, Lasteinleitung oben und unten direkt in den Putz (verändert nach Zhang 2000: 10)

Verputzte Strohballen

Es wurden sechs flach liegende Ballen, je drei mit Lehm- und Zementputz getestet. In allen Fällen wurde 2-lagig, jeweils ca. 20 mm zu einer Gesamtstärke von 40 mm aufgetragen.

Um die Interaktion zwischen Putz und Ballen zu untersuchen, wurde mit 3 unterschiedlichen Belastungsarten getestet:

1. Lasteinleitung unten und oben in Putz und Ballen
2. Lasteinleitung unten in Putz und Ballen, oben nur in den Ballen
3. Lasteinleitung ausschließlich in den Ballen

Lasteinleitung oben und unten in Putz und Ballen (siehe hierzu Abbildung 5.2*)*

- Bei verputzten Ballen, bei denen die Lasteinleitung oben und unten sowohl in den Putz als auch in den Ballen erfolgte, können die oben beschriebenen Phasen analog zu unverputzten Ballen identifiziert werden.
- Verglichen mit unverputzten Ballen verhalten sich die verputzten Ballen deutlich steifer.
- In den Phasen 1 und 2 können keine wesentlichen Unterschiede zwischen Lehm- und Zementverputzten Ballen festgestellt werden.
- Danach weisen die Proben jedoch deutliche Unterschiede auf. Phase 3 ist bei der lehmverputzten Probe deutlich ausgeprägter, der weitere Kurvenverlauf jedoch gleichmäßiger als bei dem zementverputzten Ballen (Zhang 2000: 9).

Putz teilweise oder nicht direkt belastet (siehe hierzu Abbildung 5.3 *und* Abbildung 5.4*)*

Die Ergebnisse dieser Tests werden in Zhang (2000) nicht weiter ausgeführt.

Anhand von Fotografien und Diagrammen lässt sich jedoch Folgendes ablesen:

- Es kommt zu einem Abscheren und Brechen des Putzes.
- Bei nicht vollständig mitbelastetem Putz verhält sich der Ballen weicher, Phase 3 ist bei diesen Ballen weniger ausgeprägt.
- Ob sich die Ballen mit teilweise belastetem Putz oder unbelastetem Putz insgesamt steifer verhalten, ist nicht ersichtlich.



Abbildung 5.3: Abscheren des Putzes (Zhang 2000: 15)

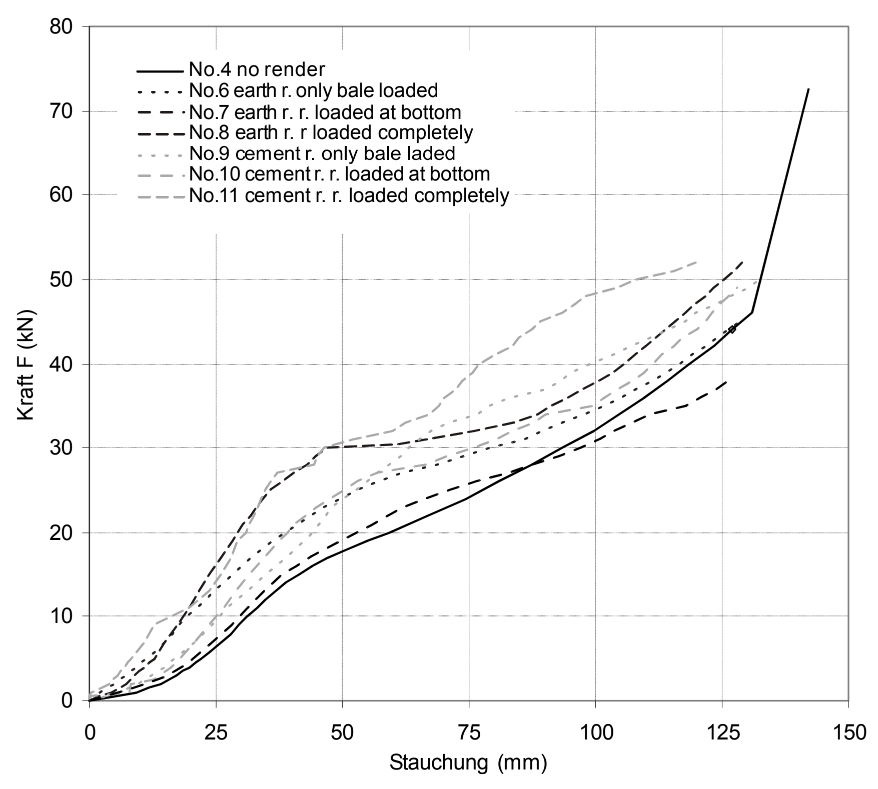


Abbildung 5.4: Spannungs-Dehnungs-Diagramm verputzter und unverputzter Ballen (nach Zhang 2000: 15)

5.2 *Wandelemente verputzt, Ballen flach liegend*

In den Jahren 2000-2002 wurde im Projekt "A Pilot Study examining and comparing the load bearing capacity and behaviour of an eart rendered straw bale wall to cement rendered straw bale wall" das elastomechanische Verhalten von Wandkonstruktionen aus flach liegenden Strohballen anhand zweier Testwände untersucht.

5.2.1 Material

Verwendet wurden flach liegende 2-String Strohballen mit durchschnittlichen Abmessungen von 0,358x0,463x0,838 m. Die durchschnittliche Ballenmasse wurde mit 15,39 kg errechnet, der durchschnittliche Feuchtegehalt mit 12,11% angegeben [entsprechend ρ = 110,8 kg/m³, ρ_{tr} = 97,4 kg/m³, Anm. d. Vf.]. Es werden keine Angaben zu der Strohsorte gemacht (Zhang/Faine 2003: 7, 19).

Es wurden 2 Testwände aufgebaut.
Wand 1 (2-geschossig, Kalkzementputz, armiert)
- Höhe: 4,045 m (11 Ballenlagen),
- Länge: 2,6 m,
- Im Verband gemauert, verstärkt mit Ballennägeln aus 12 mm Stahlstäben,
- Seitliche Begrenzung aus Sperrholzplatten gegen Stahlrahmen,
- Vorspannung: Ist wahrscheinlich, die Höhe ist jedoch nicht dokumentiert [für die Berechnung der Stauchung in % werden pauschal 3% d. Ausgangshöhe, = 121 mm angenommen, Anm. d. Vf.],
- Maschendraht vollflächig als Putzträger und – Armierung,
- 2 Putzlagen, insgesamt ca. 35-40 mm stark.

Wand 2 (eingeschossig, Lehmputz, nicht armiert)
- Höhe: 2,55 m (7 Ballenlagen),
- Länge: 2,73 m,
- Keine Ballennägel, keine Putzarmierung,
- Seitliche Begrenzung aus Sperrholzplatten gegen Stahlrahmen,
- Vorspannung: ca. 80 mm [3% d. Ausgangshöhe, Anm.d.Vf.],
- 2 Putzlagen a ca. 20 mm, + Finish ca. 5 mm (Zhang/Faine 2003: 4ff).

5.2.2 Testablauf, Beobachtungen

- Belastung der Wände über Hydraulikpressen,
- Kraftmessung über Kraftmessdosen und Messverstärker,
- Manuelles Aufzeichnen von Kraft und Weg (je 2 Messstellen),
- Kalkzementputzwand zeigt nach dem Test fast keine Risse auf,
- Hohe Geräuschbildung und große Risse in der Lehmputzwand,

- Eine Schrägstellung der oberen Lasteinleitungsplatte wird beobachtet (Zhang/Faine 2003: 7ff).

5.2.3 Ergebnisse

- Die Lehmputzwand weist eine geringere Steifigkeit auf als die Kalkzementputzwand,
- Nach dem „Brechen“ des Putzes steifen sich die Wände weiter aus,
- Die Wände werden zwar gestaucht, bleiben aber ansonsten in Position,
- Bezogen auf ein Gebäude bedeutet dies: Bei Überlast schrumpft das Gebäude zwar, bricht jedoch nicht zusammen (Zhang/Faine 2003: 9ff).

Siehe hierzu auch Abbildung 5.5.

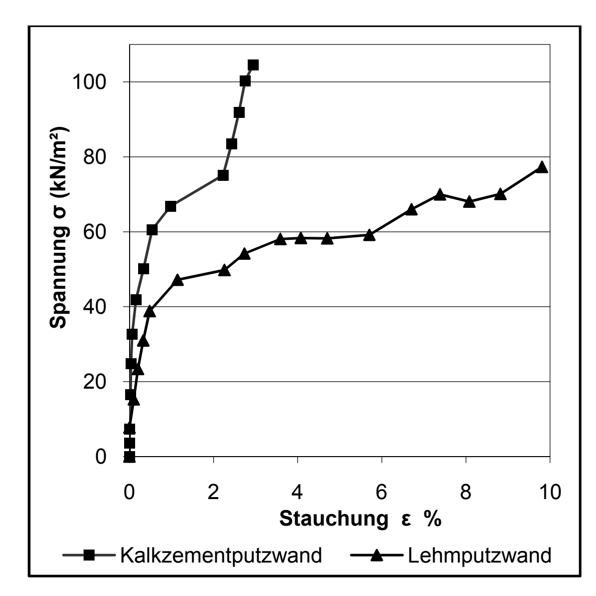


Abbildung 5.5: Spannungs-Stauchungs-Diagramm verputzter Wände aus flach liegenden Strohballen (Daten aus Zhang/Faine 2002: 10f)

5.3 Wandelement verputzt, Ballen hochkant liegend

2005 wurde im Projekt “Preliminary Discusson of Bale on Edge Wall Test“ das elastomechanische Verhalten von Wandkonstruktionen aus hochkant liegenden Strohballen anhand einer Testwand untersucht. Testaufbau und Ablauf ähnelt dem aus Zhang/Faine (2003).

Spezifikationen:

- Wandhöhe: 5 Ballenlagen: 2,21 m,
- Wandlänge: 7,2 m,
- Wandbreite: 0,39 m (ohne Putz) bzw. 0,47 m (mit Putz),
- 3% Vorkompression,
- Aufbringen von insgesamt 40 mm Lehmputz in 2 Lagen,
- Der Lehmputz wurde komplett mitbelastet.

Beobachtungen, Ergebnisse:

- Der Putz war schwerer aufzubringen als bei den Wänden aus flach liegenden Ballen.
- Die Wand ist deutlich steifer als die Vergleichswand aus flach liegenden Ballen [was sicherlich zu Teilen daran liegt, dass der Lehmputz direkt durch die obere Lasteinleitungsplatte mitbelastet wurde, Anm. d. Vf.].
- Versagen der Wand durch horizontales Brechen des Putzes bei F = 89,52 kN [entsprechend σ = 85 kN/m², Anm. d. Vf.].
- Zhang/Faine (2005) resümieren: Lasttragende, lehmverputzte Wände aus hochkant liegenden Kleinballen sind geeignet zum Bau von Strohballenhäusern (Zhang/Faine 2005, zitiert nach King 2006: 82f).

6 Taha Ashour 2003: “The use of renewable agricultural by-products as bulding materials”

Ashour arbeitete im Rahmen seiner o.g. Dissertation an der FAL Braunschweig und der Zagazing Universität Benha Branch Kairo auch zum Thema elastomechanisches Verhalten von Gersten- und Weizenstrohballen.

6.1 Material

Im Rahmen der Untersuchungen wurden 219 Weizen und 240 Gerstenballen mit den Strohballenpressen Welger AP 61 bzw. AP 730 hergestellt.
Tabelle 6.1 gibt Auskunft über Art, Anzahl und Spezifikationen der im Rahmen der Arbeit hergestellten Strohballen:

Tabelle 6.1: Verwendete Strohballen in Ashour 2003, Daten entnommen aus Ashour 2003:139 ff

Ballen Anzahl und Art	Ballenpresse[1]	Ballenlänge l (m)	Ø Trockendichte[2] ρ_{tr} (kg/m³)
210 Weizen	Welger AP 61 bzw. AP 730[1]	0,60-0,74 (Ø 0,67)	91,67
240 Gerste	Welger AP 61[1] bzw. AP 730[1]	0,56-0,75 (Ø 0,66)	66,44

: Presskanal: 36 cm x 48 cm [2]: Eigene Berechnung.

Die Ballen wurden in Dichtegruppen eingeteilt, wobei nicht alle Strohsorten in jeder Gruppe vertreten sind, siehe Tabelle 6.2:

Tabelle 6.2: Dichtegruppen in Ashour 2003, Daten aus Ashour 2003: 146

Dichte ρ (kg/m³)	**Trockendichte Weizen ρ_{trW} (kg/m³)[1]**	**Trockendichte Gerste ρ_{trG} (kg/m³)[1]**
61 – 70		51,3 - 58,9
71 – 80		59,7 - 67,3
81 – 90	72,1 - 80,1	68,1 - 75,7
91 – 100	81,0 - 89,0	76,5 - 84,1
101 – 110	89.9 - 97,9	
111 – 120	98,8 - 106,8	
121 – 130	107,7 - 115,7	
131 – 140	116,6 - 124,6	

[1]: Eigene Berechnungen

Es werden keine Angaben über die Summe der auf ihr elastomechanisches Verhalten überprüften Strohballen im Allgemeinen und die Anzahl der Strohballen in den einzelnen Dichtegruppen im Speziellen gemacht.

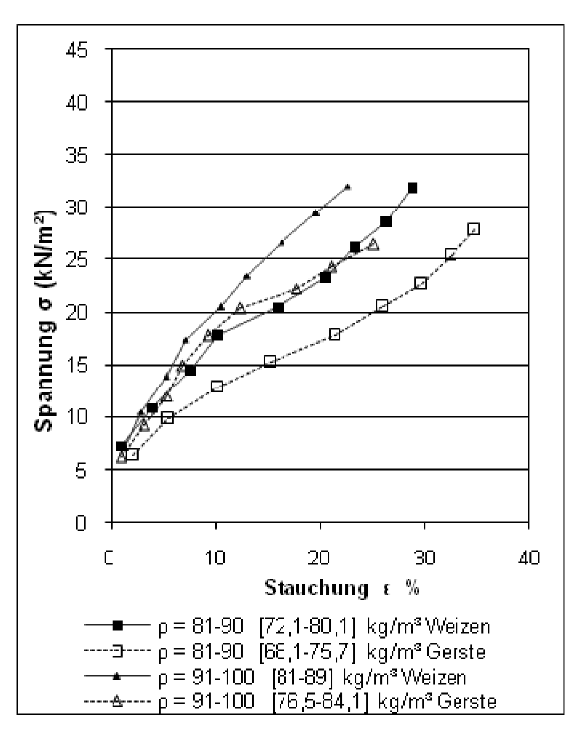


Abbildung 6.1: Spannungs-Stauchung-Kennlinien flach liegender Weizen- und Gerstestrohballen unterschiedlicher Dichten (Daten aus Ashour 2005: 206)

6.2 Spannungs-Stauchungs-Beziehung

Weizen- und Gerstenballen wurden flach liegend (horizontal orientation/flat) und hochkant liegend (vertical orientation/on edge) bis zu einer maximalen Spannung von 34,5 kN/m² (flach liegend) bzw. 56 kN/m² (hochkant liegend) belastet.

Ashour stellt fest, dass die Spannungs-Stauchungskennlinien dichter Ballen unabhängig von der Strohart und der Ballenorientierung steiler verlaufen als die Kennlinien weniger dichter Ballen. Während die Kennlinien der dichten Ballen im von Ashour untersuchten Bereich annähernd linear verlaufen, weisen die Ballen mit abnehmender Dichte eine zunehmende Nichtlinearität auf. Die Kennlinien hochkant liegender Ballen verlaufen unabhängig von der Strohsorte steiler als die flach liegender Ballen.
Die Kennlinien von Weizenstrohballen verlaufen unabhängig von der Dichte steiler als die von Gerstenstrohballen. Dies ist bei hochkant liegenden Ballen besonders deutlich. Siehe Abbildung 6.1 und Abbildung 6.2

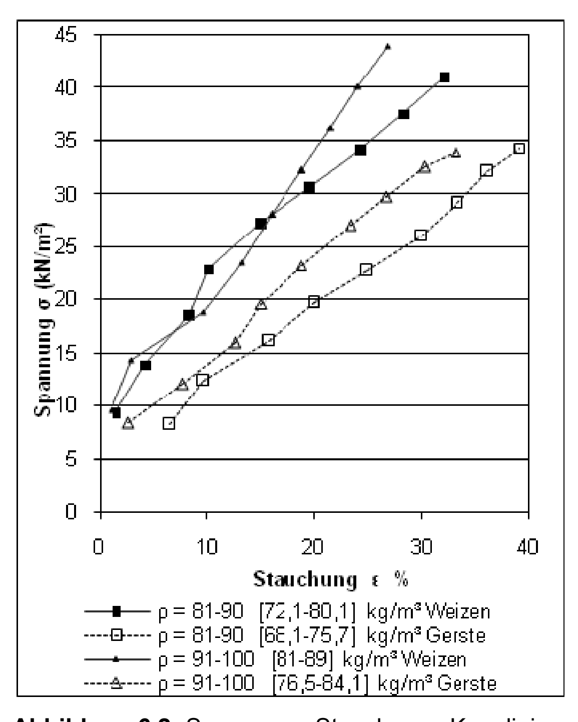


Abbildung 6.2: Spannungs-Stauchungs-Kennlinien hochkant liegender Weizen- und Gerstestrohballen unterschiedlicher Dichten (Daten aus Ashour 2005: 206)

6.3 Elastizitätsmodul

Ashour bedient sich für die Ermittlung des Elastizitätsmoduls des Hooke´schen Gesetzes und wendet es auf den gesamten ermittelten Spannungsbereich an. Gültigkeit hat das Hooke´sche Gesetz in der oben dargestellten Form jedoch ausschließlich im Bereich der Hooke´schen Geraden. Aus diesem Grund werden die bei Ashour ermittelten Werte für Elastizitätsmodule hier nicht dargestellt.

6.4 Querdehnung

Die Querdehnung wird bei Ashour anhand der Poisson-Zahl nach der Gleichung:

$$P = \frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_v}$$

beschrieben (Ashour 2003: 131)

Ashour trifft folgende Aussagen:

- Die Querdehnung steigt mit steigender Last.
- Die Querdehnung ist umso geringer, je höher die Dichte der Ballen ist.
- Die Querdehnung fällt bei hochkant liegenden Ballen geringer aus als bei flach liegenden.

Ashour (2003: 221, 225)gibt zur Berechnung der Querdehnung folgende Formeln an:

Weizen:

$$P_v = 0{,}153 - 0{,}0016 \cdot \rho + 0{,}029 \cdot F \quad (R^2 = 0.43)$$

$$P_h = 0{,}146 + 0{,}0011 \cdot \rho + 0{,}062 \cdot F \quad (R^2 = 0.77)$$

Gerste:

$$P_v = 0{,}023 + 0{,}003 \cdot \rho + 0{,}016 \cdot F \quad (R^2 = 0.36)$$

$$P_h = 0{,}303 + 0{,}00006 \cdot \rho + 0{,}0212 \cdot F \quad (R^2 = 0.28)$$

dabei ist:

P_v: Poisson-Zahl für hochkant liegende Ballen
P_h: Poisson-Zahl für flach liegende Ballen
ρ: Ballendichte (kg/m³)
F: Last (kN)
R^2: Bestimmtheitsmaß

6.5 Weitere Ergebnisse

- Alle Ballen aus Weizenstroh nahmen einige Minuten nach dem Entfernen der Last ihre ursprüngliche Höhe an. Die Belastung lag also im elastischen Bereich (Ashour 2003: 203)
- Alle Ballen aus Gerstenstroh nahmen nach dem Entfernen der Last ihre ursprüngliche Höhe an. Dies dauerte jedoch länger als bei den Strohballen aus Weizenstroh und war abhängig von der Ballendichte: Wenig dichte Ballen brauchten 13, dichte Ballen 10 Minuten um ihre ursprüngliche Form zu erreichen (Ashour 2003: 203 f).

7 Smith 2003: „Creep in Bale Walls“

Untersucht wurde das Kriechverhalten von Wänden aus unterschiedlich großen Ballen hochkant und flach liegend unterschiedlicher Stroharten mit verschiedenen Lasten über 12 Monate. Zwei Wände wurden verputzt, bei zwei Wänden wurde die Verformung nach dem Aufbringen der Last über acht Monate konstant gehalten und dann erneut belastet (vgl. Smith 2003: 1).

7.1 Material und Methode

Es werden keine Angaben zur Feuchte gemacht. Es wird hier davon ausgegangen, dass zumindest die 3-String Reisballen ähnliche Feuchten aufweisen und die Ergebnisse daher untereinander vergleichbar sind. Abbildung 7.1 visualisiert den Versuchsaufbau, Tabelle 7.1 listet Daten zu den in den Tests verwendeten Strohballenwänden auf.

Wandaufbau

Es wurden bei flach liegender Ausrichtung jeweils 6, bei hochkant liegender Ausrichtung jeweils 4 Ballen pro Wand in einem Rahmen übereinander gestapelt.
Wände E und F wurden mit einem Drahtgewebe überzogen, Wände G und H nach 1,5 Wochen unter Last mit Lehm- bzw. Kalkzementputz auf Drahtgewebe verputzt.

Versuchsablauf

Die Wände wurden durch mit Sand gefüllte Sperrholzkisten belastet.
Gemessen wurde sofort nach dem Aufbringen der Last und an den Tagen 1, 2, 7 und 14 und nach 1, 2, 6 und 12 Monaten nach dem Aufbringen der Last.
Bei den Wänden F und G wurde nach dem Aufbringen der Last das Metallgewebe arretiert und die Last entfernt. Das Metallgewebe hinderte die Ballen am Zurückfedern. Nach 44 Wochen wurde die Last wieder aufgebracht und die Kriechverformung gemessen (vgl. Smith 2003: 1f).

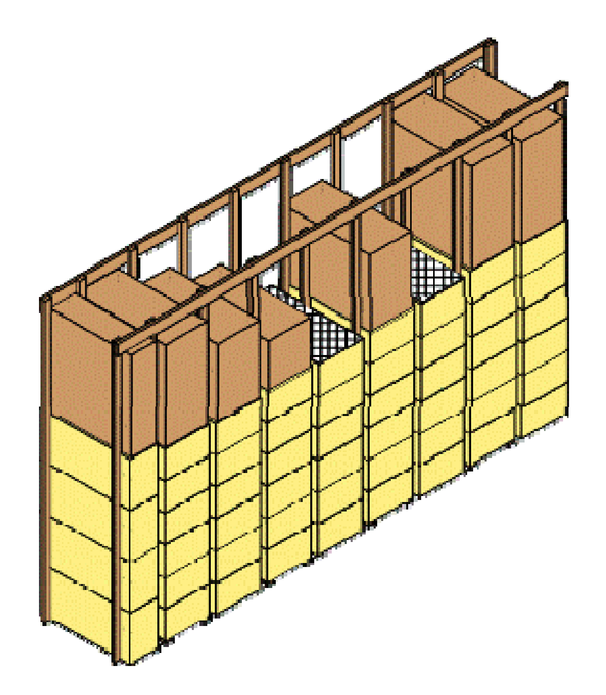


Abbildung 7.1: Versuchsaufbau (Smith 2003:5)

Tabelle 7.1: Durchgeführte Tests (Daten vgl. Smith 2003: 1f, 9)

Test, Orien-tierung	Ballenart	Ballengröße (m) (hxbxl), Bemer-kung	Spannung σ (kN/m²) (Wand-kopf)	Kraft F (kN)	Dichte ρ (kg/m³)
A fl	3-String Reis	0,38x0,58x1,2	2,5	1,78	125
B fl	3-String Reis	0,38x0,58x1,2	10	7,12	135
C fl	3-String Weizen	0,41x0,58x1,12	10,75	7,12	116
D fl	2-String Reis	0,38x0,45x1,17	13,2	7,12	120
E hl	3-String Reis	0,38x0,58x1,2	10	7,12	117
F fl	3-String Reis	0,38x0,58x1,2 Drahtgewebe	2,5	1,78	136
G fl	3-String Reis	0,38x0,58x1,2 Drahtgewebe	10	7,12	135
H fl	3-String Reis	0,38x0,58x1,2 Lehmputz	2,5	1,78	134
I fl	3-String Reis	0,38x0,58x1,2 Kalk-zementputz	10	7,12	135

fl= flach liegend; hl= hochkant liegend

7.2 Ergebnisse

(siehe Abbildung 7.2)

Smith identifiziert 4 Phasen des Kriechens:

1. Anfangsstauchung, gemessen direkt nach dem Aufbringen der Last
   - Bei den Wänden, die mit einer Spannung von σ =2,5 kN/m² beaufschlagt wurden, stellte sich eine spontane Verformung von ε = 1,1% ein
   - Bei den Wänden aus 3-String Ballen, die mit einer Spannung von σ = 10 kN/m² beaufschlagt wurden, stellte sich eine spontane Verformung von ε = 2,5% ein.
   - Bei den Wänden aus 2-String Ballen, die mit einer Spannung von σ = 13 kN/m² beaufschlagt wurden, stellte sich eine spontane Verformung von ε = 4,5% ein.
2. Frühes Kriechen tritt in den ersten zwei Wochen nach dem Aufbringen der Last insbesondere bei den hoch belasteten Wänden auf.
3. Verzögertes Kriechen: Zwischen 7 und 10 Wochen nach dem Aufbringen der Last. Die 2-String Reisballen verharren über den Testzeitraum in dieser Phase.
4. Stabilisierung: Nach ca. 10 Wochen scheinen die Wände stabil. Es treten keine weiteren messbaren Verformungen mehr auf.
   - Die Kriechverformung betrug ohne Anfangsverformung bei den Wänden aus flach liegenden 3-String Reisballen ε = 0,9% bei einer Spannung von 2,5 kN/m²
   - Und ε = 1,2% bei einer Spannung von 10 kN/m² bei gleicher Ballensorte und Ausrichtung.
   - Die flach hochkant liegenden Reisballen stabilisierten sich erst nach ca. 44

Wochen bei etwa ε = 1,4% [Es sei angemerkt, dass die durchschnittliche Dichte dieser Wand 18 kg/m³ niedriger war als die der Referenzwand, Anm. d. Vf.].

Intermittierend belastete Wände:
Wie bereits dargestellt wurden die Wände F und G zunächst belastet, dann arretiert, die Last entfernt und nach 44 Wochen wieder aufgebracht. Nach dem Wiederaufbringen der Last erfolgte eine spontane Stauchung, die sehr schnell in die beschriebene Phase 3 überging.

Verputzte Wände:
Nach dem Trocknen bzw. Abbinden des Putzes erfolgte bei der mit Kalkzement verputzten Wand keine messbare Veränderung.
Die lehmverputzte Wand weißt während des Trocknens der ersten Lehmschicht eine leichte Dehnung [sic] auf, die sich jedoch während des Durchtrocknens umkehrt. Nach dem Trocknen des Putzes tritt auch hier keine messbare Stauchung mehr auf (vgl. Smith 2007: 2f).

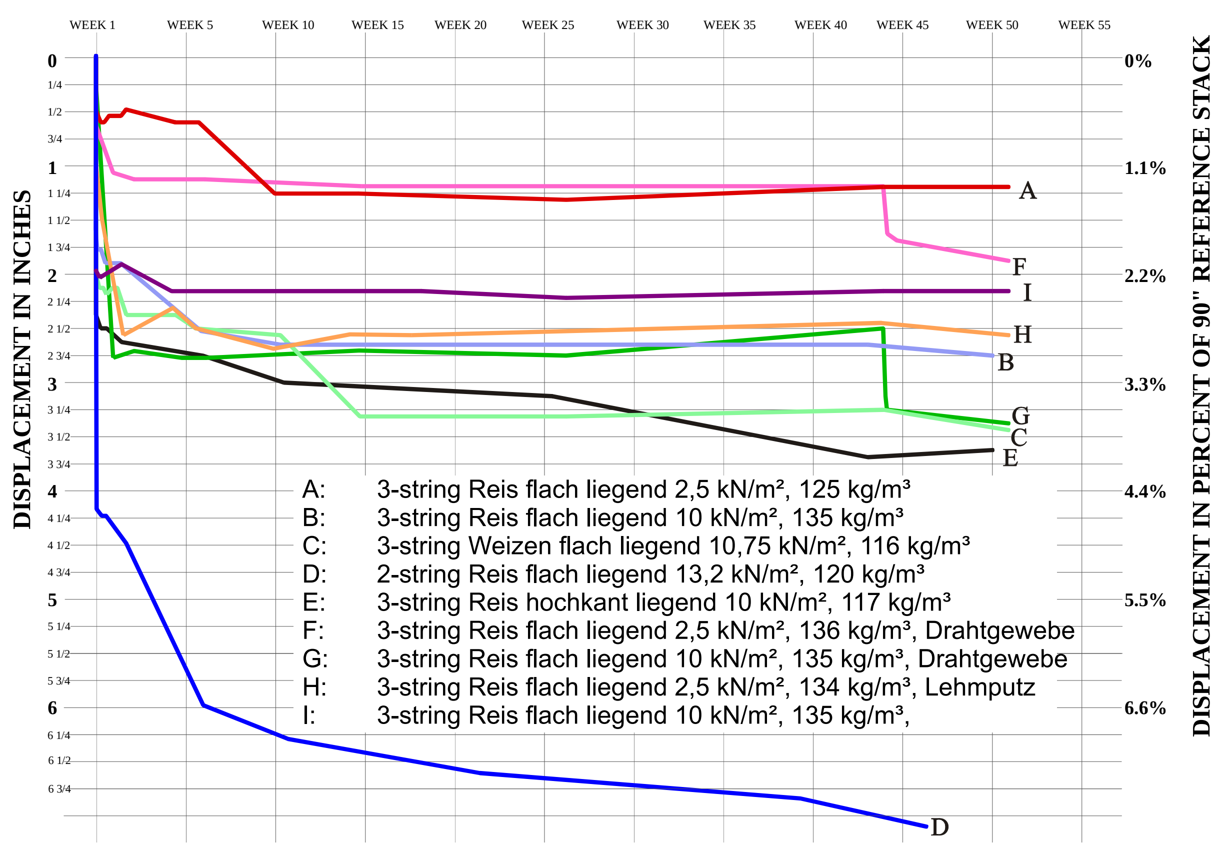


Abbildung 7.2: Darstellung des Kriechverhaltens (aus Smith 2003: 6)

8 Schmidt 2003: „Strohballendruckversuche“

Der Autor ist Architekt und für seine lasttragenden, zweigeschossigen Strohgebäude bekannt. Die Versuche wurden an der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Chur/ Schweiz durchgeführt.

8.1 Material, Tests

Untersucht wurde das Spannungs-Stauchungsverhalten von drei Quaderballen (0,73x1,25x2,50 m) und 4 HD-Ballen (0,35x0,5x1,25 m). Angaben zur Strohart, Ballendichte und Ballenfeuchte werden nicht gemacht.

Großballen wurden 1. wie geliefert, 2. mit sechs zusätzlichen Bindungen aus Verpackungsband und 3. mit einer Längseinspannung über Verpackungsbänder (getestet) flach liegend getestet.

Kleinballen wurden 1. flach liegend wie geliefert, 2. flach liegend mit drei zusätzlichen Bindungen aus Verpackungsband, 3. hochkant liegend mit Einspannung in Längsrichtung über Verpackungsbänder [die Einspannung ließ ein „Kippen“ des Ballens zu, Anm. d. Vf.] und 4. hochkant liegend wie geliefert getestet (vgl. Schmidt 2003: 3).

8.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse liegen in Form von Prüfprotokollen mit Angaben zu den Abmessungen des Prüfkörpers und einem Kraft-Stauchungs-Diagramm sowie Testfotografien vor. Die Auswertung erfolgte durch den Verfasser der vorliegenden Dissertation. Siehe Abbildung 8.1.

- Der Unterschied zwischen flach liegenden eingespannten und nicht eingespannten Quaderballen ist marginal. Der E-Modul der Quaderballen konnte aus den vorliegenden Daten mit E = 420 kN/m² berechnet werden.
- Der Unterschied zwischen den flach liegenden Kleinballen mit und ohne Einspannung ist signifikant. Die E-Module liegen bei E = 350 kN/m² für den nicht eingespannten bzw. bei E = 622 kN/m² für den eingespannten flach liegenden Ballen.
- Der Unterschied zwischen den hochkant liegenden Kleinballen mit und ohne Einspannung ist signifikant. Die E-Module liegen bei E = 309 kN/m² für den nicht eingespannten bzw. bei E = 996 kN/m² für den eingespannten hochkant liegenden Ballen.
- Der eingespannte hochkant liegende HD-Ballen ist steifer als der flach liegende eingespannte. Bei nicht eingespannten Ballen sind die Unterschiede marginal.
- Es fällt besonders auf:
  - o Die sehr hohen E-Module der eingespannten HD-Ballen
  - o Das schlechte Abschneiden der Quaderballen gegenüber den HD-Ballen
  - o Die marginalen Unterschiede zwischen dem eingespannten und dem nicht eingespannten Quaderballen, auch im Vergleich mit den diesbezüglichen Unterschieden bei den HD-Ballen

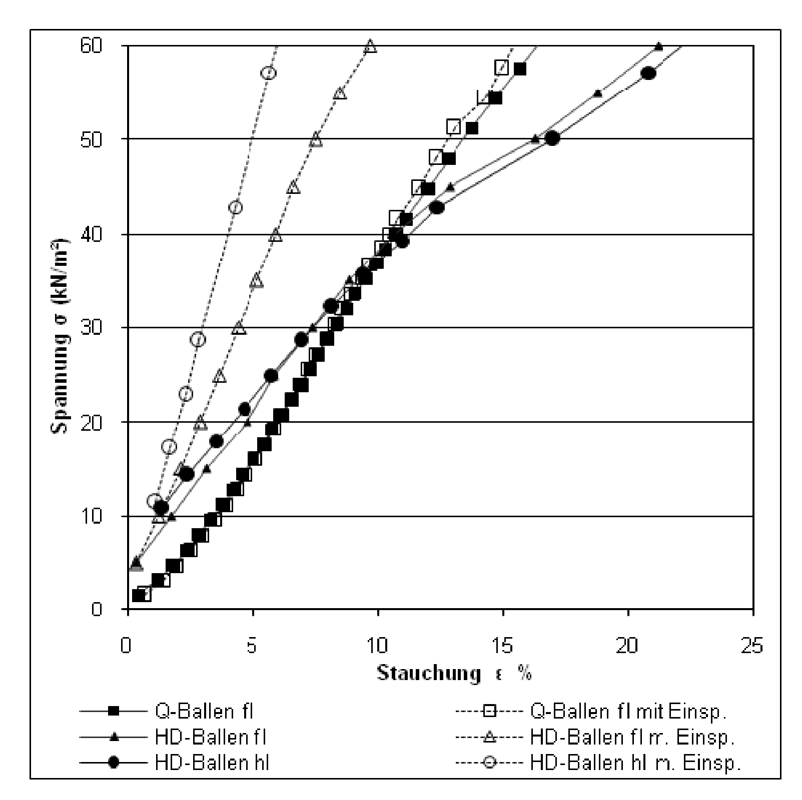


Abbildung 8.1: Spannungs-Stauchungs-Diagramm (Daten aus Schmidt 2003: 4ff)

9 Vardy/MacDougall 2006: „Compressive Testing and Analysis of Plastered Straw Bales"

Die Autoren führten Untersuchungen an der Queen´s University, Kingston, Kanada durch.

9.1 Material, Tests

Es wurden insgesamt 32 Strohballen getestet, von denen zwei unverputzt und 30 mit verschiedenen Putzen in unterschiedlichen Stärken überzogen waren. Die Ballen wurden flach- und hochkant stehend getestet. An sechs Ballen wurde ein Wasserschaden simuliert, drei wurden zyklischer belastet. Der Putz wurde direkt mitbelastet. Es werden keine Angaben zur Strohart, zur Strohfeuche, Dichte und zu den Ballenabmessungen gemacht. Aus Fotografien ist ersichtlich, dass 2-String-Bales verwendet wurden.



Abbildung 9.2: Typisches Versagen eines flach liegenden Ballen (Vardy/MacDougall 2006: 7)

9.2 Ergebnisse

1. Die Druckfestigkeit verputzter Strohballen hängt entscheidend von deren Orientierung ab. Sie liegt bei flach liegenden Ballen um etwa 36% höher als bei hochkant liegenden Ballen (vgl. Vardy/MacDougall 2006: 14). Abbildung 9.1 zeigt die Unterschiede zwischen flach- und hochkant liegenden verputzten Strohballen auf. Anzumerken ist, dass zwar die ultimative Last bei flach liegenden Strohballen deutlich höher, die Gesamtverformung bei hochkant liegenden Ballen signifikant geringer ist.

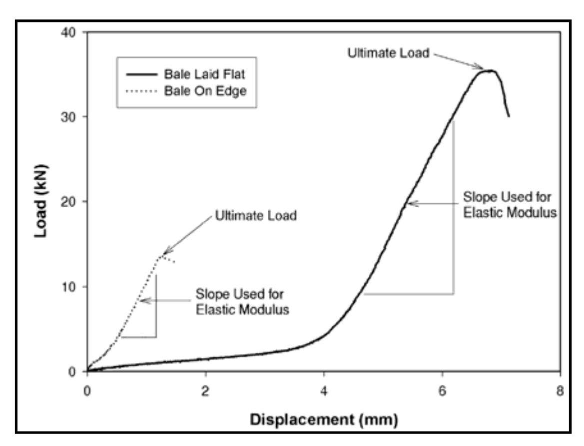


Abbildung 9.1: Kraft-Stauchungs-Diagramm (Mittelwerte) für verputzte Strohballen (Vardy/MacDougall 2006: 8)

2. Flach liegende Ballen versagen durch ein Brechen, ein Zerdrücken des Putzes (Abbildung 9.2). Hochkant liegende Ballen versagen durch ein Ausbeulen des Putzes bevor es zum Zerdrücken kommt (Abbildung 9.3). So erklärt sich der große Unterschied zwischen den Orientierungen. (vgl. Vardy/MacDougall 2006: 14).



Abbildung 9.3: Typisches Versagen eines hochkant liegenden Ballens (Vardy/MacDougall 2006: 8)

3. Die Druckfestigkeit und die Dicke des Putzes selbst haben einen signifikanten Effekt auf die Druckfestigkeit des Ballens. Dabei hat die Putzdicke größere Auswirkung als die Festigkeit: Aus der Verdoppelung der Putzstärke resultiert ein Anstieg der Druckfestigkeit um 65%, aus einer Verdoppelung der Putzdruckfestigkeit nur eine Steigerung der Ballenfestigkeit um 25%, siehe Abbildung 9.4

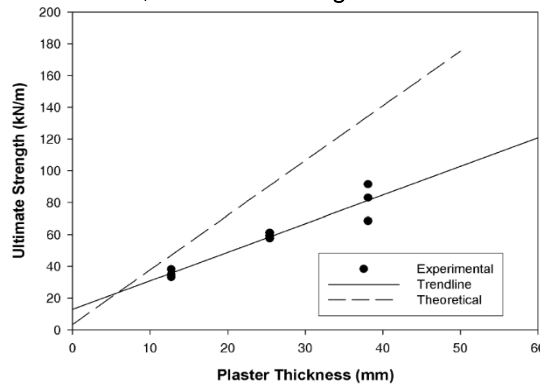


Abbildung 9.4: Anstieg der Druckfestigkeit bei Erhöhung der Putzstärke (Vardy/MacDougall 2006: 10)

4. Die Druckfestigkeit aller getesteten Varianten, bis auf „hochkant stehend, 12,7 m Putz“, lag deutlich über der in typischen Wohngebäuden auftretenden Anforderungen.

5. Die E-Module der unterschiedlichen Proben differierten sehr stark und waren schwer vorhersagbar. Es traten E-Module zwischen 5,69 und 26,76 MN/m² auf (vgl. Vardy/MacDougall 2006: 14).

10 Danielewicz/Reinschmidt 2007: „Lastversuche mit großen Quaderballen an der Hochschule Magdeburg-Stendal“

Die Versuche wurden im Rahmen des DBU-Projektes „Grundlagen zur bauaufsichtlichen Anerkennung der Strohballenbauweise- Weiterentwicklung der lasttragenden Konstruktionsart und Optimierung der bauphysikalischen Performance“ durchgeführt. Untersucht wurde das Verhalten von flach liegenden Quaderballen und Wänden aus Quaderballen in flach liegender Orientierung. Alle Angaben wurden dem Zwischenbericht Version 2a (Danielewicz/Reinschmidt 2007) entnommen.

10.1 Material

Getestet wurden Ballen aus Roggenstroh aus kontrolliertem biologischem Anbau. Es wurde eine New-Holland D710 Quaderballenpresse mit folgendem Kanalmaß verwendet: 0,48x0,85 m. Die Presse verfügt über 4 Knoter. Die durchschnittliche Ballenlänge betrug 1,85 m, die durchschnittliche Rohdichte 129 kg/m³. Der Feuchtegehalt wurde nicht dokumentiert. Es wurden insgesamt 27 Ballen getestet (Danielewicz/Reinschmidt 2007: 23 f).

10.2 Spannungs-Stauchungs-Beziehung, Querdehnung von Einzelballen

Laut Danielewicz/Reinschmidt 2007: 33 lassen sich drei unterschiedliche Phasen identifizieren:

1. Stauchung von ε = 0-15 % mit einem E-Modul von etwa E = 500 kN/m²
2. Bereich von ε = 15-30 % mit einer Abflachung der σ – ε – Linie
3. Bereich von ε = 30-50 % mit einer Zunahme der Spannungen und einem stetig wachsenden E – Modul“

Es wurde festgestellt, dass die Steifigkeit der Ballen mit steigender Dichte zunimmt. Es wurde eine plastische Verformung festgestellt und mit ε = 35% direkt nach dem Versuch und ε = ca. 25% nach etwa einem Monat quantifiziert. Die Querdehnung wurde bei einer Stauchung von ε_h = 50% in Längsrichtung mit ε_l = 16% und in Ballenquerrichtung mit ε_b = 13,3% angegeben (vgl. Danielewicz/Reinschmidt 2007: 33).

10.3 Relaxation

10.3.1 Einzelballen

Es wurden insgesamt 5 Ballen geprüft. Gemessen wurde die Spannungsabnahme bei Stauchungen zwischen ε = 10 und 30% über unterschiedliche Zeiträume.

Ergebnisse (siehe hierzu Abbildung 10.1)**:**
Die Relaxationsgeschwindigkeit nimmt mit der Zeit ab:

- In der ersten Stunde nach Beginn der Messungen ist bei allen Proben ein schneller Spannungsabbau auf durchschnittlich 76% der Anfangsspannung zu beobachten.
- In den ersten zwei Tagen nach dem Beginn der Messung erfolgte ein weiterer, wesentlicher Spannungsabfall auf durchschnittlich 59% der Anfangsspannung.
- Nach etwa zwei Wochen war eine Stabilisierung bei durchschnittlich 51% zu erkennen.
- Zum Ende der Tests nach 33 Tagen lag die Spannung im Durchschnitt bei 48% der Ausgangsspannung.

Die Relaxation ist abhängig von der Anfangsspannung bzw. der Stauchung:

- o Der Spannungsabbau im Ballen mit der geringsten Stauchung (ε = 10%) war bereits nach zwei Wochen abgeschlossen
- o Bei den um ε = 30% gestauchten Ballen war auch nach 4 Wochen noch ein signifikanter Spannungsabbau zu verzeichnen (Danielewicz/Reinschmidt 2007: 38 ff).

10.3.2 Wandelemente

Es wurde ein Wandelement aus sieben übereinander gelegten Ballen mit durchschnittlicher Rohdichte von ρ = 130,8 kg/m³ um ε = 23,5% gestaucht. Dabei wurde Kraft von F = 170 kN [entsprechend einer Spannung von ca. σ = 105 kN/m², Anm. d. Vf.] aufgebracht. Ergebnis: Das Relaxationsverhalten von Wänden ist mit dem von Einzelballen vergleichbar (Danielewicz/Reinschmidt 2007: 62ff).

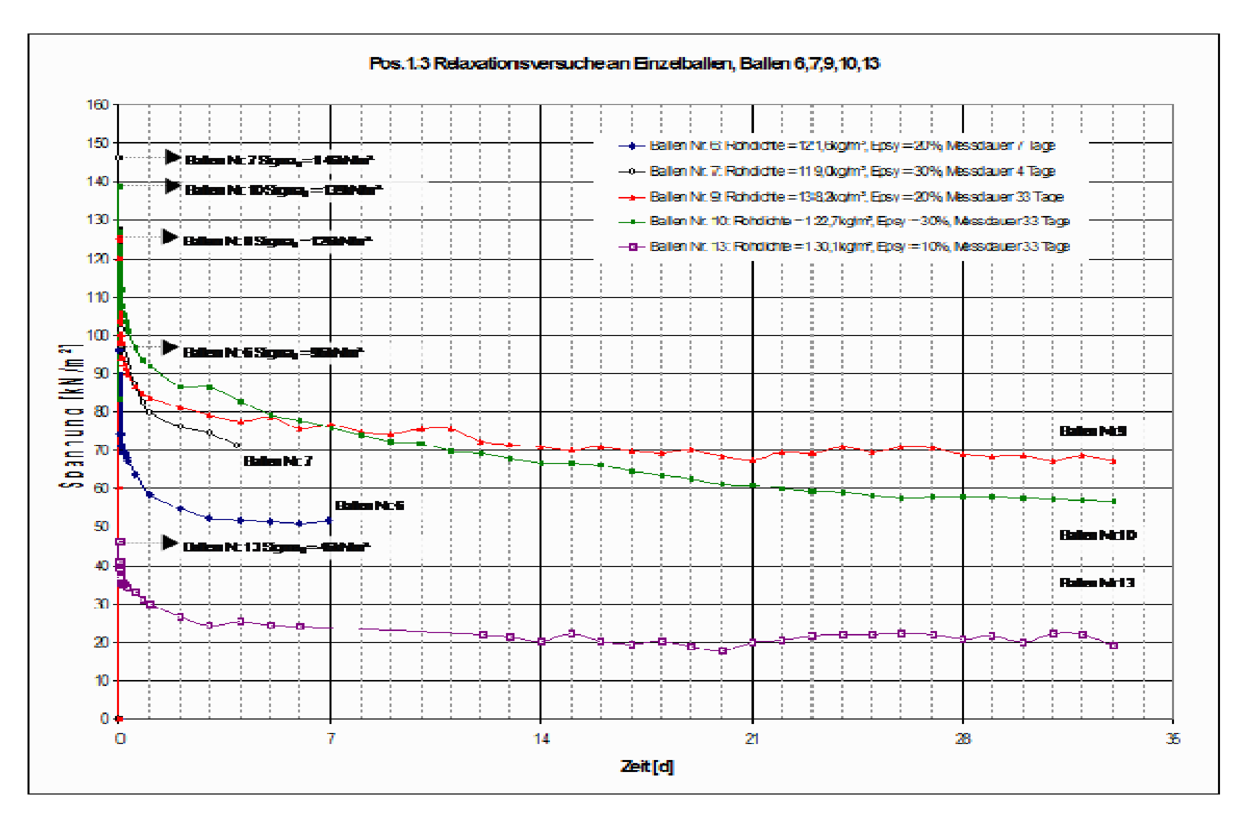


Abbildung 10.1: Relaxationsversuche an Einzelballen (Danielewicz/Reinschmidt 2007: 41)

10.4 Erntegarnausfall

Bei 2 Ballen wurde ein Teilausfall bzw. Ausfall des Erntegarns simuliert. Dazu wurden die Ballen gestaucht (Ballen 6: ε = 20%, Ballen 26: ε = 15%) und die Relaxation gemessen. Nach einer Woche wurden bei Ballen 6 (ε = 20%) zwei von vier Garnbändern durchtrennt. Die Spannung fiel spontan um σ = 1,7% und ging dann wieder zur gleichmäßigen Relaxation über. Bei Ballen 26 (ε = 15%) wurden alle 4 Garnbänder durchtrennt. Das Durchtrennen der einzelnen Bänder erfolgte im Abstand von c. 5 Sekunden. Nach jeder Durchtrennung sackte die Spannung ab, wobei der Spannungsverlust bei jedem Band zunahm. Insgesamt brach die Spannung um σ = 22,1% ein. Wie bei Ballen 6 stabilisierte sich der Spannungsabbau nach wenigen Sekunden (Danielewicz/Reinschmidt 2007: 49 ff).

10.5 Druckversuche mit unterschiedlicher Belastungsgeschwindigkeit

Ziel dieser Versuche war eine Verifizierung des Zusammenhangs zwischen Belastungsgeschwindigkeit und Spannungs-Stauchungs-Kennlinie bzw. E-Modul.
Zwei Versuchsballen gleicher Rohdichte (ρ = 125 bzw. 127 kN/m³) wurden um 30% gestaucht. Die Stauchung wurde im ersten Fall nach 1:45 min., im 2. Fall nach 49:10 min. erreicht.
Ergebnis: Die Belastungsgeschwindigkeit hat im Rahmen der geprüften Parameter keinen Einfluss auf die Lastreaktion der Strohballen (Danielewicz/Reinschmidt 2007: 52 f).

10.6 Druckversuche mit Teilflächenbelastung

Die Last wurde über eine Teilfläche von 43% der Strohballengrundfläche zentrisch eingeleitet und um ε = 30% gestaucht. Der Versuch wurde an 2 Strohballen mit Dichten von ρ = 129 und 133 kg/m³ durchgeführt und mit vollflächig belasteten Ballen verglichen.

Ergebnis: Bis zu einer Stauchung von ε = 10% lassen sich im Vergleich mit vollflächig belasteten Ballen keine signifikanten Spannungsdifferenzen erkennen. Über diesen Bereich hinaus werden jedoch Abflachungen der Kennlinien deutlich: Der Elastizitätsmodul sinkt.

Anhang II.2: Darstellung der Versuchsergebnisse zum elastomechanischen Verhalten von Strohballen und Strohballenwänden

1 Zu den physikalischen Eigenschaften der Versuchsballen

Tabelle 1.1 listet Länge, Feuchtegehalt, Trockendichte und Anzahl der Proben der jeweiligen Strohart auf. Abbildung 1.1 visualisiert Trockendichten, Probenlängen und Feuchtegehalte.
Die Proben aus Roggenstroh weisen mit 0,985 m die größte durchschnittliche Länge (abgesehen von den Q-Ballen mit 2,27 m) auf, während die Ballen aus Hanffasern mit 0,77 m die geringste durchschnittliche Länge haben. Die Standardabweichung ist bei den Weizenballen mit 8,4 % am höchsten, bei den Q-Ballen aus Weizenstroh mit 0,9 % am niedrigsten.
Der durchschnittliche Feuchtegehalt u der verschiedenen Stroharten liegt zwischen 0,146 bei Bohnenstroh und 0,095 bei Miscanthus. Die dazugehörige Standardabweichung ist bei den Switchgrasballen mit 30% am höchsten, bei Bohnenstroh mit 2,12% am niedrigsten.
Die höchste mittlere Trockendichte wurde für die Ballen aus Hanffasern mit 109,9 kg/m³ bestimmt, die niedrigste mittlere Trockendichte für Gerste mit 82,32 kg/m² berechnet. Die höchste Standardabweichung haben hier die Miscanthusballen mit 12,3 %, die niedrigste die Q-Ballen aus Weizenstroh mit 0,7%.

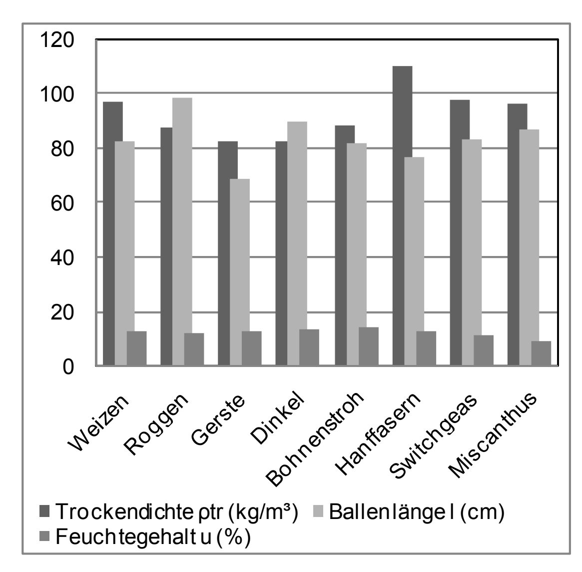


Abbildung 1.1: Durchschnittliche Trockendichten, Längen und Feuchtegehalte der Versuchsballen

Tabelle 1.1: Durchschnittliche Länge, Feuchtegehalt, Trockendichte und Anzahl der verwendeten Proben

Strohart	Probenlänge l (m)	s_X Länge (%)	Feuchtegehalt u (g/g)	s_X Feuchte (%)	Trockendichte ρ_{tr} (kg/m³)	s_X Trockendichte (%)	Anzahl Proben
Weizen	0,826	5,0	0,128	18,8	96,9	10,5	169 (7*)
Roggen	0,985	1,4	0,122	18,0	87,3	4,6	6*
Gerste	0,686	2,4	0,132	20,0	82,3	11,9	6*
Dinkel	0,895	2,9	0,139	5,7	82,4	2,9	6*
Bohnenstroh	0,817	2,0	0,146	2,1	88,0	1,3	3*
Hanffasern	0,770	8,4	0,129	5,1	109,9	3,8	2*
Switchgras	0,829	6,6	0,115	30,4	97,4	9,6	2*
Miscanthus	0,865	6,4	0,095	5,3	96,3	12,3	2*
Q-Weizenb	2,270	0,9	0,116	5,0	103,9	0,7	3
						Summe	199 (34*)
s_X= Standardabweichung; * Messungen von Struwe im Rahmen von Struwe (2007) durchgeführt							

2 Spannungs-Stauchungstests an Einzelballen

Spannungs-Stauchungstests wurden, wie in Teil II Kapitel 3.4, *Versuchsdurchführungen beschrieben*, an flach liegenden, hochkant liegenden und stehenden Strohballen durchgeführt. Getestet wurden seitlich eingespannte und seitlich nicht eingespannte Strohballen, Lehm verputzte und nicht Lehm verputzte Ballen sowie Klein- und Großballen.

2.1 Spannungs-Stauchungstests an flach liegenden Ballen

Die Tests wurden an Ballen sieben unterschiedlicher „Stroh-“arten unterschiedlicher Dichte, mit und ohne Einspannung, verputzt und unverputzt durchgeführt.

2.1.1 Spannungs-Stauchungstests an FL HD-Ballen ohne seitliche Einspannung

Die Spannungs-Stauchungstests an flach liegenden Kleinballen ohne seitliche Einspannung wurden wie in Teil II, Abschnitt 3.4.1 beschrieben an der Materialprüfanstalt der Uni Kassel mit der Prüfanlage „Toni Technik“ durchgeführt. Es wurden die Ballen mit den Probennummern 1.1.1.1 bis 1.1.1.6 verwendet. Tabelle 2.1 listet physikalische Balleneigenschaften sowie Testergebnisse auf.

Beobachtungen

Während des Pressens ist in den Ballen ein Knistern zu vernehmen. Es wird kein Reißen des Polypropylengarns verzeichnet. Nach dem Entfernen der Last dehnen sich die Ballen schnell wieder aus.

Unter zunehmender Spannung wird neben der vertikalen Stauchung eine Längendehnung beobachtet, die mit steigender Spannung abnimmt und die gegen Ende des Testes fast zum Erliegen kommt.

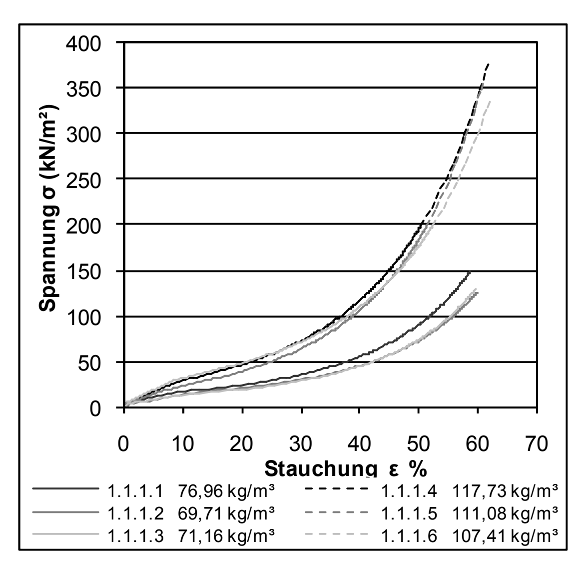


Abbildung 2.1: Spannungs-Stauchungsdiagramm Kleinballen flach liegend ohne seitliche Einspannung

Das Spannungs-Stauchungsdiagramm (Abbildung 2.1) zeigt die ermittelten Kennlinien über den gesamten Messbereich. Deutlich ist die Ähnlichkeit der Kurven eines Dichtebereiches untereinander aber auch zwischen den beiden Dichtebereichen zu erkennen. Auffällig ist, dass die Kurven bei den dichten Ballen deutlich steiler, der Elastizitätsmodul also höher ist als bei den lockeren Ballen.

Bei den dichten Ballen ist zunächst bis ca. 20 kN/m² ein annähernd lineares Verhalten erkennbar. Über diesen Bereich hinaus gewinnen die Proben bis zum Ende des gemessenen Bereiches zunehmend an Steifigkeit.

Bei den lockeren Ballen ist es schwer einen linearen Bereich zu erkennen. Die Steifigkeit nimmt deutlich langsamer zu als bei den dichten Ballen.

Für das Bauen mit Strohballen ist nicht der gesamte Teil des erstellten Kennlinienfeldes relevant. Daher wird in Abbildung 2.2 der relevante Ausschnitt dargestellt.

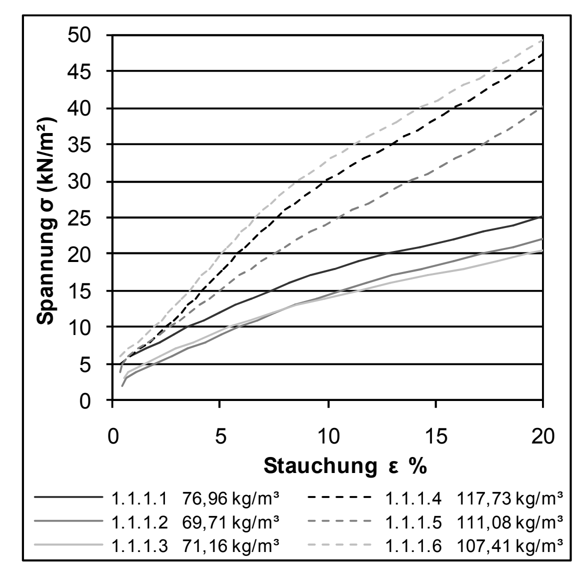


Abbildung 2.2: Spannungs-Stauchungsdiagramm Kleinballen flach liegend ohne seitliche Einspannung (Ausschnitt)

Bei der Betrachtung des Ausschnittes wird deutlich, dass der linear-elastische Bereich nicht im Nullpunkt des Koordinatensystems beginnt, sondern ihm ein „Aussteifen“ der Ballen voran geht. Dass die einzelnen Kennlinien nicht im Koordinatenursprung beginnen, resultiert aus der beschriebenen Anfangskraft von 1,7 kN.



Abbildung 2.3: Ballen 1.1.1.5 bei einer Spannung von ca. 130 kN/m²

Tabelle 2.1: Physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse Kleinballen flach liegend ohne seitliche Einspannung

Proben-nummer	Abmessungen (m) l	b	h	u (g/g)	ρ_{tr} (kg/m³)	σ_{10} (kN/m²)	σ_e kN/m²	ε_{40} (%)	ε_p (%)	E-Modul kN/m²
1.1.1.1	0,700	0,480	0,360	0,158	76,96	18,00	15,00	32,19	-3,57	137,34
1.1.1.2	0,790	0,480	0,360	0,152	69,71	14,00	11,00	36,67	-1,76	134,80
1.1.1.3	0,720	0,480	0,360	0,154	71,16	14,00	10,00	37,02	-1,82	137,49
1.1.1.4	0,850	0,480	0,360	0,164	117,73	30,00	19,00	15,97	-1,48	272,16
1.1.1.5	0,790	0,480	0,360	0,164	111,08	24,00	22,00	20,05	-2,28	201,82
1.1.1.6	0,850	0,480	0,360	0,185	107,41	33,00	20,00	14,42	-0,93	332,78
Ø Ballen „locker“	0,737	0,480	0,360	0,155	72,61	15,33	12,00	35,29	-2,38	136,54
Ø Ballen „dicht“	0,830	0,480	0,360	0,171	112,07	29,00	20,33	16,81	-1,56	268,92

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte; σ_{10}: Spannung bei 10% Stauchung; σ_e: Spannung am Ende des Proportionalbereiches; ε_{40}: Stauchung bei einer Spannung von 40 kN/m²; ε_p: Nullpunktverschiebung; Ø Mittelwert aus den betreffenden Werten

2.1.2 Spannungs-Stauchungstests an FL, unverputzten HD-Ballen mit seitlicher Einspannung

Es wurde das Spannungs-Stauchungsverhalten von insgesamt 28 flach liegenden, unverputzten Kleinballen mit seitlicher Einspannung getestet. Elf davon bestanden aus Weizenstroh, je drei aus Roggen-, Gerste-, Dinkel- und Bohnenstroh, zwei aus Hanffasern und je einer aus Switchgras und Miscanthus. Ein Test wurde an einer teilbelasteten Probe durchgeführt. Zum Testablauf siehe Teil II Abschnitt 3.4.2, *Tests mit dem HD-Ballen Kombiprüfstand*.

Weizenballen

Es wurden insgesamt 10 flach liegende, seitlich eingespannte, unverputzte Weizenballen einem Spannungs-Stauchungstest unterzogen, von denen drei im Rahmen der Diplomarbeit von Struwe (2007) durchgeführt wurden. Tabelle 2.2 listet physikalische Balleneigenschaften sowie Testergebnisse auf.

Beobachtungen

Während des Pressens ist in den Ballen ein Knistern zu vernehmen. Bei einigen Ballen wird ein starkes Schrägstellen der Lasteinleitungsplatte beobachtet. Dies war bei Probe 1.4.2 besonders ausgeprägt. Aus dieser Schrägstellung resultiert das Abknicken der Verformungslinie dieses Ballens bei einer Stauchung von ca. 9%.
Das Spannungs-Stauchungsdiagramm (Abbildung 2.4) zeigt die ermittelten Kennlinien über den gesamten Messbereich. Es ist erkennbar, dass alle Kennlinien unabhängig von der Trockendichte zunächst relativ eng zusammen liegen. Ab einer Spannung von etwa 15 kN/m² spreizt sich das Kennlinienfeld auf, wobei die dichteren Ballen in der Regel einen steileren Verlauf mit höherer Linearität aufweisen.

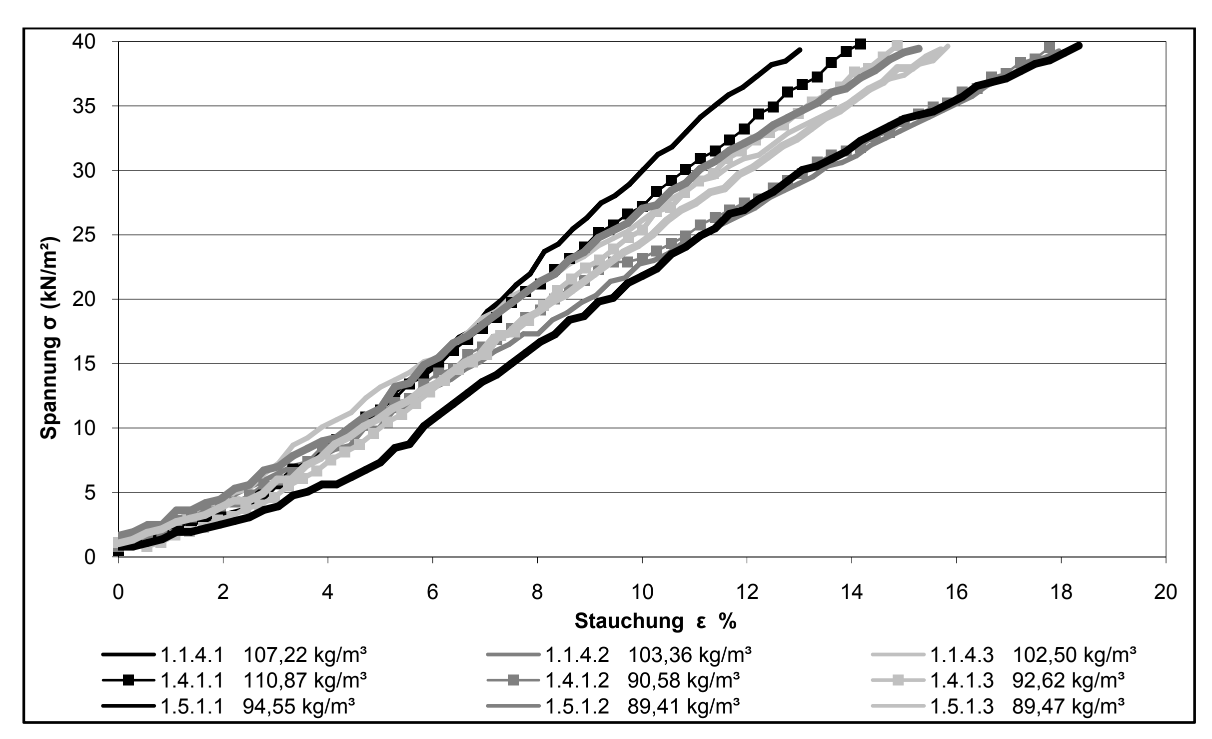


Abbildung 2.4: Spannungs-Stauchungsdiagramm Kleinballen flach liegend mit seitlicher Einspannung

Tabelle 2.2: Physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse Kleinballen flach liegend mit seitlicher Einspannung

Proben-nummer	Abmessungen (m) l	b	h	u (g/g)	ρ_{tr} (kg/m³)	σ_{10} (kN/m²)	σ_e kN/m²	ε_{40} (%)	ε_p (%)	E-Modul kN/m²
1.1.4.1	0,828	0,481	0,369	0,118	107,22	30,07	23,70	13,01	1,45	354,56
1.1.4.2	0,879	0,484	0,362	0,118	100,92	22,72	17,30	17,96	1,13	262,24
1.1.4.3	0,854	0,480	0,360	0,124	102,50	26,12	20,21	15,83	0,57	291,67
1.4.1.1*	0,838	0,480	0,360	0,126	110,87	27,19	34,36	14,17	1,13	309,96
1.4.1.2*	0,838	0,480	0,360	0,126	90,58	23,17	22,31	17,78	1,00	272,94
1.4.1.3*	0,821	0,481	0,370	0,129	92,62	25,36	25,36	14,86	1,73	306,79
1.5.1.1	0,847	0,480	0,360	0,124	94,55	21,79	21,79	18,33	2,01	272,67
1.5.1.2	0,852	0,480	0,360	0,140	89,41	27,03	35,21	15,28	-0,51	254,47
1.5.1.3	0,839	0,480	0,360	0,118	89,47	22,29	25,15	18,61	1,65	265,93
1.5.8.1	0,873	0,480	0,363	0,098	104,51	24,17	37,94	15,70	0,98	272,92
Ø Ballen	0,847	0,481	0,362	0,122	98,266	24,991	26,333	16,153	1,115	286,414

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte; σ_{10}: Spannung bei 10% Stauchung; σ_e: Spannung am Ende des Proportionalbereiches; ε_{40}: Stauchung bei einer Spannung von 40 kN/m²; ε_p: Nullpunktverschiebung; Ø Mittelwert aus den betreffenden Werten; *Messungen im Rahmen der Diplomarbeit von Struwe (2007) durchgeführt

Roggen, Gerste, Dinkel, Bohnen, Hanf, Switchgras und Miscanthusballen
Die Messungen wurden im Rahmen der Diplomarbeit von Struwe (2007) durchgeführt und in dieser Dissertation neu interpretiert. Tabelle 2.3 listet zusammengefasst physikalische Balleneigenschaften sowie Testergebnisse auf.

Beobachtungen
Im Folgenden werden die Beobachtungen wiedergegeben, die Timo Struwe während der Tests für seine Diplomarbeit gemacht (Struwe 2007: 45ff) hat. Ansonsten wurden lediglich die Rohdaten, wie sie durch die SPS des Prüfstandes ausgegeben werden, übernommen.

Alle Daten wurden völlig neu interpretiert. Der E-Modul wurde nach der korrekten Formel ermittelt. Die Ermittlung der Trockendichten basiert auf den Sorptionsisothermen und Formeln, die im Rahmen dieser Dissertation ermittelt bzw. entwickelt wurden. Interpretationen der Kennlinien stammen vom Verfasser.
Der besseren Übersicht halber werden die Kennlinien der getesteten Ballen nach Strohart getrennt in drei Diagrammen zusammengefasst dargestellt.

Roggen: Roggen 2 und 3 wurden laut Struwe (2007: 49) ohne Winkelverzerrung (Schrägstellung der Lasteinleitungsplatte) zusammenge-

presst. Bei Roggen 1 trat hingegen schon sehr früh eine Verformung auf, die jedoch im weiteren Verlauf des Tests nur gering zunahm.
Alle Verformungskennlinien der Roggenballen weisen eine hohe Linearität auf. Die Steilheit der Kurven nimmt mit der Trockendichte zu, jedoch nicht proportional. Dass die Verformungskennlinie von Roggen 1 so deutlich unterhalb der anderen Kennlinien liegt, steht vermutlich im Zusammenhang mit der Winkelverzerrung des Ballens (Abbildung 2.5).

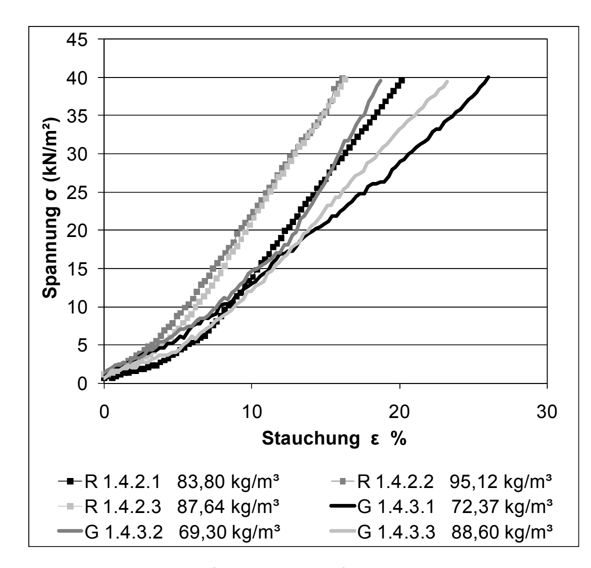


Abbildung 2.5: Spannungs-Stauchungskennlinien unverputzter Roggen- und Gerstenballen flach liegend mit Einspannung

Gerste: Struwe (Struwe 2007: 47) beobachtet bei allen Gerstenballen eine früh einsetzende Winkelverzerrung, die bei Gerste 1 und 3 bis zum Testende zunahm und den Ballen stark deformierte. Bei der Probe Gerste 2 nahm die Winkelverzerrung im Verlauf des Tests nur wenig zu.
Diese Beobachtung spiegelt sich im Kennlinienfeld wider. Die Spannungs-Stauchungkurve von Gerste 2, liegt zwischen den beiden anderen Kennlinien und hat die höchste Linearität, obwohl sie die Probe mit der geringsten Trockendichte ist (Abbildung 2.5).

Dinkel: Struwe (2007: 51) schildert eine leichte Winkelverzerrung aller Dinkelballen während des Tests. Dies drückt sich im Abknicken der Kennlinien zwischen 25 und 30 kN/m² aus. Während sich die Kurven bezüglich ihrer Steilheit in Abhängigkeit von der Trockendichte erwartungsgemäß verhalten, sackt die Kennlinie von Dinkel 3 nach dem Abknicken unter die Kennlinie des leichteren Ballens Dinkel 2 (Abbildung 2.6).

Bohnenstroh: Laut Struwe (2007: 53) treten bei den Tests mit flach liegenden Ackerbohnenballen keine Winkelverzerrungen ein. Die Kennlinien sind von entsprechend hoher Linearität geprägt. Ein Bezug zwischen Ballentrockendichte und Steilheit der Kennlinien ist hier nicht evident, jedoch liegen die Dichten der Ballen sehr nah beieinander (Abbildung 2.6).

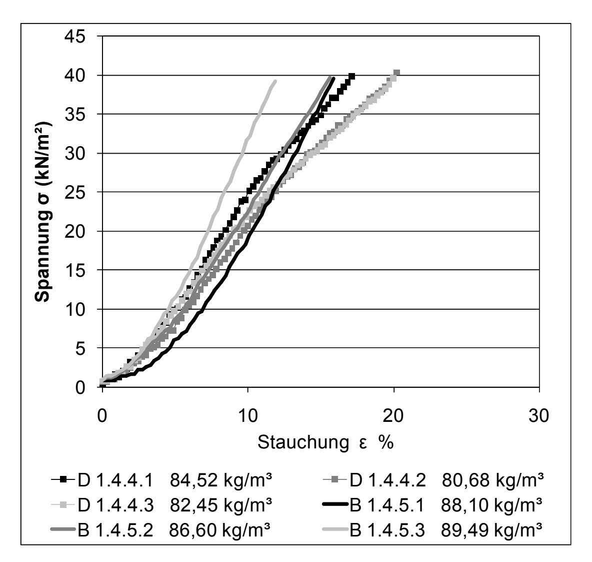


Abbildung 2.6: Spannungs-Stauchungskennlinien unverputzter Dinkel- und Bohnenstrohballen mit seitlicher Einspannung

Hanf
Die Versuche mit den Hanfballen werden bei Struwe (2007) nicht beschrieben. Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass beide Hanfkurven keinen linearen Bereich aufweisen. Daher ist es nicht möglich einen E-Modul nach DIN 826 zu bilden (Abbildung 2.7).

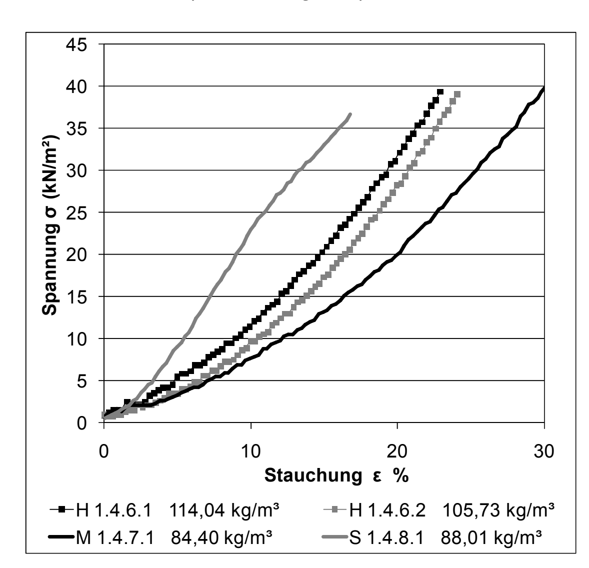


Abbildung 2.7: Spannungs-Stauchungskennlinien unverputzter Hanf-, Switchgras-, und Miscanthusballen mit seitlicher Einspannung

Miscanthus
Auch der Versuch mit dem Miscanthusballen ist bei Struwe nicht dokumentiert. Auch hier lassen sich kein linearer Bereich und damit kein Elastizitätsmodul feststellen (Abbildung 2.7).

Switchgras
Struwe (2007: 55) stellt bei dem getesteten Switchgrasballen eine leichte Winkelverzerrung bei hoher Spannung fest, was als Abknicken der Verformungskennlinie bei etwa 25 kN/m² sichtbar ist (Abbildung 2.7).

Tabelle 2.3: Physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse Kleinballen flach liegend mit seitlicher Einspannung

Proben-nummer	Abmessungen (m)			u (g/g)	ρ_{tr} (kg/m³)	σ_{10} (kN/m²)	σ_e kN/m²	ε_{40} (%)	ε_p (%)	E-Modul kN/m²
	l	b	h							
R 1.4.2.1	0,971	0,512	0,367	0,165	83,80	13,88	39,64	20,16	4,33	250,34
R 1.4.2.2	1,000	0,500	0,365	0,103	95,12	22,34	35,49	16,16	1,79	267,15
R 1.4.2.3	0,972	0,510	0,355	0,100	87,64	21,60	29,98	16,34	2,84	296,15
Ø Roggen	0,981	0,507	0,362	0,123	88,853	19,270	35,037	17,555	2,983	271,215
G 1.4.3.1	0,708	0,499	0,369	0,153	72,37	12,99	34,88	26,02	2,06	162,11
G 1.4.3.2	0,699	0,483	0,368	0,170	69,30	14,62	18,40	18,75	6,26	294,79
G 1.4.3.3	0,694	0,483	0,368	0,145	88,60	11,97	37,45	23,24	4,34	210,18
Ø Gerste	0,700	0,488	0,368	0,156	76,756	13,195	30,243	22,670	4,221	222,357
D 1.4.4.1	0,870	0,479	0,368	0,147	84,52	25,14	26,52	17,12	1,93	305,73
D 1.4.4.2	0,913	0,482	0,371	0,147	80,68	20,66	23,54	20,22	1,97	259,38
D 1.4.4.3	0,888	0,475	0,366	0,134	82,45	22,65	15,53	19,95	1,17	261,97
Ø Dinkel	0,890	0,479	0,368	0,143	82,550	22,814	21,863	19,094	1,691	275,693
B 1.4.5.1	0,824	0,488	0,366	0,143	88,10	19,45	39,54	15,85	3,80	328,38
B 1.4.5.2	0,794	0,346	0,476	0,144	86,60	22,83	39,63	15,61	2,30	297,69
B 1.4.5.3	0,832	0,354	0,474	0,150	89,49	32,12	33,88	11,86	2,39	420,47
Ø Bohne	0,817	0,396	0,439	0,146	88,063	24,802	37,683	14,439	2,830	348,847
H 1.4.6.1	0,705	0,323	0,498	0,122	114,04	11,43	/	22,91	/	/
H 1.4.6.2	0,834	0,341	0,509	0,135	105,73	9,73	/	24,05	/	/
Ø Hanf	0,770	0,332	0,504	0,129	109,88	10,578	/	23,479	/	/
S 1.4.7.1	0,920	0,342	0,523	0,100	84,40	7,62	/	30,12	/	/
M 1.4.8.1	0,883	0,400	0,503	0,080	88,01	22,97	24,65	16,75	1,41	261,09

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte; σ_{10}: Spannung bei 10% Stauchung; σ_e: Spannung am Ende des Proportionalbereiches; ε_{40}: Stauchung bei einer Spannung von 40 kN/m²; ε_p: Nullpunktverschiebung; Ø Mittelwert aus den betreffenden Werten; R: Roggen; G: Gerste; D: Dinkel; B: Bohne; H: Hanf; S: Switchgras; M: Miscanthus.

2.1.3 Spannungs-Stauchungstests an FL, verputzten HD-Ballen mit seitlicher Einspannung

Es wurden insgesamt sechs flach liegende, seitlich eingespannte, verputzte Weizenballen einem Spannungs-Stauchungstest unterzogen. Bei je 3 Weizenballen erfolgte die Lasteinleitung direkt (1.5.7.1-3) bzw. indirekt (1.5.6.1-3) in den Putz (zur Erläuterung siehe Teil 2 Abschnitt 3.4.2.6, *Spannungs-Stauchungstests an verputzen Strohballen*).Tabelle 2.4 listet physikalische Balleneigenschaften sowie Testergebnisse auf.

Beobachtungen
Das Spannungs-Stauchungsdiagramm (Abbildung 2.13) zeigt die ermittelten Kennlinien über den gesamten Messbereich. Unschwer lassen sich die Kurven der Ballen mit direkter und indirekter Lasteinleitung in den Putz unterscheiden. Die Kennlinien beider Gruppen weisen eine hohe Linearität auf, jedoch sind die Kurven der Ballen, bei denen die Last direkt in den Putz eingeleitet wird, deutlich steiler, d.h. der E-Modul ist höher als bei den Proben, bei welchen die Lasteinleitung in den Putz indirekt erfolgt.

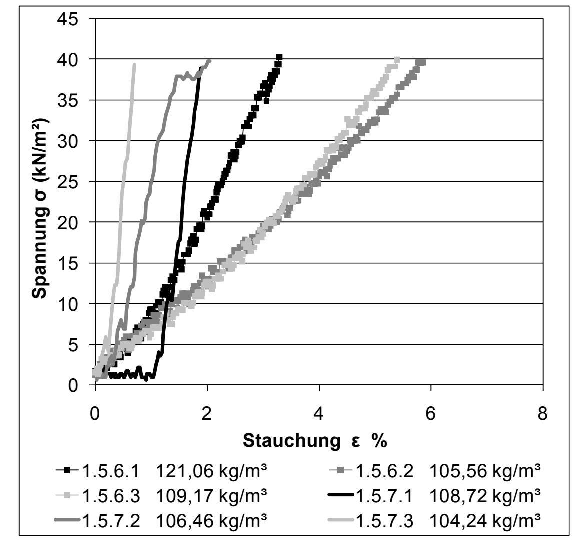


Abbildung 2.8: Spannungs-Stauchungsdiagramm verputzter Kleinballen flach liegend mit seitlicher Einspannung

Innerhalb der Gruppe „indirekte Lasteinleitung“ ist deutlich zu erkennen, dass die Kennlinien umso steiler verlaufen, je höher die Trocken-

dichte ist, während bei der Gruppe „direkte Lasteinleitung“ dieser Effekt nicht erkennbar ist. Bei Probe 5.6.1 sind nach dem Erreichen der Maximalspannung leichte Frakturen feststellbar. Proben 5.6.2 und 5.6.3 brechen mittig entzwei. Die Lasteinleitungselemente drücken sich deutlich in den Ballen ein.




Abbildung 2.9: Bruch des Putzes und Eindrücken der Lasteinleitungselemente nach dem Erreichen der Maximallast bei Probe 1.5.6.2

Bei der Probe 1.5.7.1 wurde bewusst auf den kraftschlüssigen Verbund durch Gips zwischen Putz und Lasteinleitungselementen verzichtet. Gut sichtbar ist, dass sich die Stauchung bis ca. 1% zunächst ohne wesentliche Spannungszunahme erhöht. Dann liegt die Lasteinleitungsplatte kraftschlüssig auf, die Spannung steigt vergleichbar mit den anderen Proben dieser Gruppe an.
Bei Probe 1.5.7.2 ist ein plötzliches Abknicken der Kurve und eine Stauchungszunahme ohne wesentliche Erhöhung der Spannung sichtbar. An diesem Punkt fand ein Bruch des Putzes statt.




Abbildung 2.10: Bruch des Putzes bei Probe 1.5.7.2

Tabelle 2.4: Physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse Kleinballen flach liegend, verputzt mit seitlicher Einspannung

Probennummer	Abmessungen (m) l	b	h	u (g/g)	ρ_{tr} (kg/m³)	σ_{10} (kN/m²)	σ_e kN/m²	ε_{40} (%)	ε_p (%)	E-Modul kN/m²
1.5.6.1	0,803	0,372	0,335	0,141	121,06	/	37,20	3,29	0,47	1449,46
1.5.6.2	0,826	0,368	0,367	0,114	105,57	/	34,39	5,86	-0,06	650,54
1.5.6.3	0,845	0,375	0,360	0,145	109,17	/	19,96	5,39	0,04	634,23
Ø indirekt	0,825	0,372	0,354	0,134	111,93	/	30,517	4,846	0,153	911,412
1.5.7.1	0,846	0,364	0,377	0,122	108,72	/	37,77	1,88	1,11	5034,33
1.5.7.2	0,828	0,377	0,372	0,145	106,46	/	30,23	2,04	0,36	3947,46
1.5.7.3	0,816	0,330	0,368	0,125	104,25	/	39,33	0,71	0,18	7476,60
Ø direkt	0,830	0,357	0,372	0,131	106,48	/	35,777	1,544	0,553	5486,127

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte; σ_{10}: Spannung bei 10% Stauchung; σ_e: Spannung am Ende des Proportionalbereiches; ε_{40}: Stauchung bei einer Spannung von 40 kN/m²; ε_p: Nullpunktverschiebung; Ø Mittelwert aus den betreffenden Werten

2.1.4 Spannungs-Stauchungstest an einem partiell belasteten, FL HD-Weizenballen mit seitlicher Einspannung

Es wurde ein Ballen wie in Teil 2 Abschnitt 3.4.2.7, *Spannungs-Stauchungstests mit partiell belasteten, unverputzten Ballen*, beschrieben getestet. Tabelle 2.5 listet physikalische Balleneigenschaften sowie Testergebnisse auf:

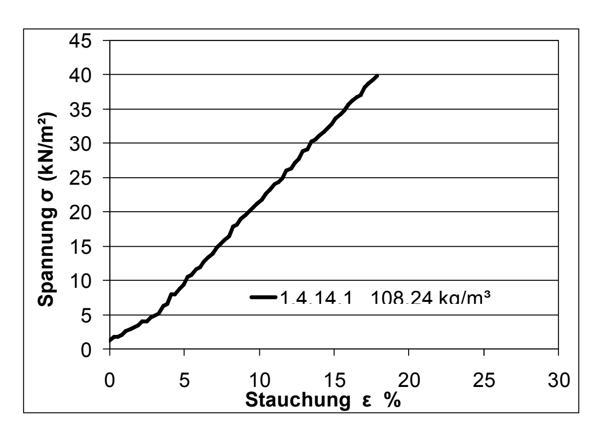


Abbildung 2.11: Spannungs-Stauchungsdiagramm Kleinballen flach liegend teilbelastet mit seitlicher Einspannung

Beobachtungen
Während des Pressens ist in den Ballen ein Knistern zu vernehmen. Es wird kein Reißen des Polypropylengarns verzeichnet. Nach dem Entfernen der Last dehnen sich die Ballen schnell wieder aus. Es wird eine Winkelverzerrung über die Ballenquerachse beobachtet. Der als Belastungselement verwendete Holzbalken drückt sich nur mäßig in das Stroh ein. Trotz der aufgetretenen Winkelverzerrung weißt die Spannungs-Stauchungskennlinie eine hohe Linearität auf.




Abbildung 2.12: Probe 1.4.14.1 nach Erreichen der Maximalspannung

Tabelle 2.5: Physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse Kleinballen flach liegend unverputzt, mit seitlicher Einspannung, teilbelastet

Probennummer	Abmessungen (m) l	b	h	u (g/g)	ρ_{tr} (kg/m³)	σ_{10} (kN/m²)	σ_e kN/m²	ε_{40} (%)	ε_p (%)	E-Modul kN/m²
1.4.14.1	0,863	0,476	0,364	0,100	108,24	21,27	30,26	17,86	1,16	246,06

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte; σ_{10}: Spannung bei 10% Stauchung; σ_e: Spannung am Ende des Proportionalbereiches; ε_{40}: Stauchung bei einer Spannung von 40 kN/m²; ε_p: Nullpunktverschiebung; Ø Mittelwert aus den betreffenden Werten

2.2 Spannungs-Stauchungstests an hochkant liegenden Strohballen

Die Tests wurden an Groß- und Kleinballen fünf verschiedener „Stroh-“arten unterschiedlicher Dichte, mit und ohne Einspannung, verputzt und unverputzt, sowie an halbierten Strohballen durchgeführt.

2.2.1 Spannungs-Stauchungstests an HL HD-Ballen ohne seitliche Einspannung

Die Spannungs-Stauchungstests an hochkant liegenden Kleinballen ohne seitliche Einspannung wurden, wie in Teil **II**, Abschnitt 3.4.1 beschrieben, an der Materialprüfanstalt der Uni Kassel mit der Prüfanlage „Toni Technik“ durchgeführt. Es wurden die Ballen mit den Probennummern 1.1.2.1 bis 1.1.2.6 verwendet. Tabelle 2.6 listet physikalische Balleneigenschaften sowie Testergebnisse auf.

Beobachtungen
Während des Pressens ist in den Ballen ein Knistern zu vernehmen. Es wird kein Reißen des Polypropylengarns verzeichnet. Nach dem Entfernen der Last dehnen sich die Ballen schnell wieder aus.
Unter zunehmender Spannung beginnen die Ballen „auszuknicken“, die Lasteinleitungsplatte stellt sich schräg, die Tests müssen abgebrochen werden, bevor der maximale Hub der Testanlage erreicht wird, um Beschädigungen an der Aufhängung der Lasteinleitungsplatte und am Presszylinder zu verhindern.

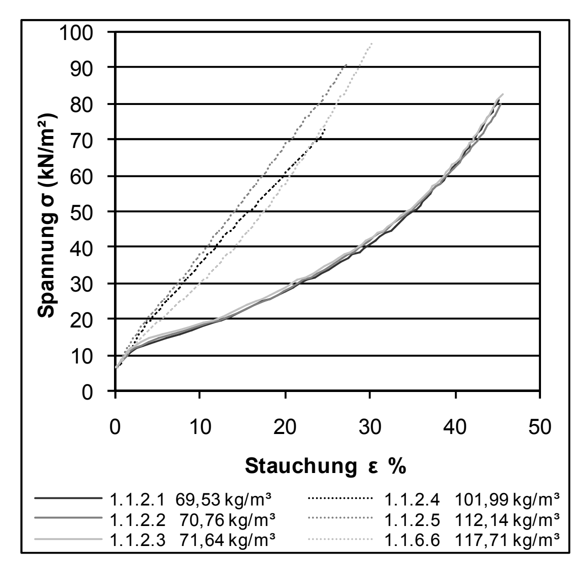


Abbildung 2.13: Spannungs-Stauchungsdiagramm Kleinballen hochkant liegend ohne seitliche Einspannung

Das Spannungs-Stauchungsdiagramm (Abbildung 2.13) zeigt die ermittelten Kennlinien über den gesamten Messbereich. Deutlich ist die Ähnlichkeit der Kurven eines Dichtebereiches untereinander zu erkennen. Zwischen den Dichtebereichen sind deutliche Unterschiede sichtbar. Die Graphen der dichten Ballen weisen eine im Vergleich zu den locke-

ren Ballen hohe Linearität und deutlich größere Steilheit und damit einhergehend einen höheren Elastizitätsmodul auf.
Für das Bauen mit Strohballen ist nicht der gesamte Teil des erstellten Kennlinienfeldes relevant. Daher wird in Abbildung 2.14 der relevante Ausschnitt dargestellt.

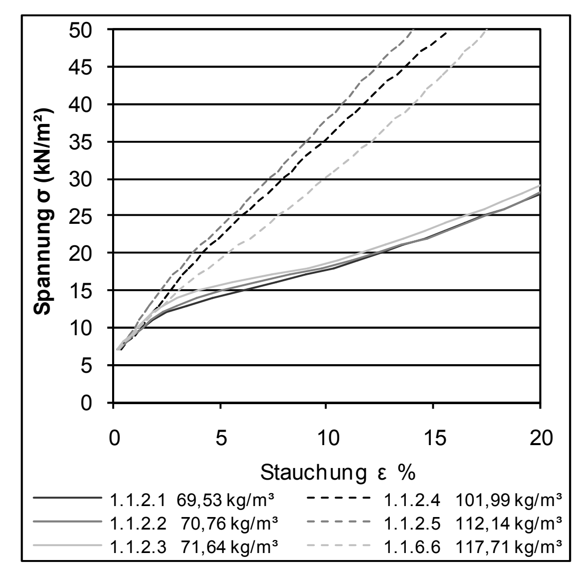


Abbildung 2.14: Spannungs-Stauchungsdiagramm Kleinballen hochkant liegend ohne seitliche Einspannung (Ausschnitt)

Bei der Betrachtung des Ausschnittes wird deutlich, dass der linear-elastische Bereich nicht im Nullpunkt des Koordinatensystems beginnt, sondern ihm ein „Aussteifen“ der Ballen voran geht. Dass die einzelnen Kennlinien nicht im Koordinatenursprung beginnen, resultiert aus der beschriebenen Anfangskraft von 1,7 kN.



Abbildung 2.15: Ballen 1.1.2.1 bei einer Spannung von ca. 70 kN/m². Deutlich zu sehen ist das Ausknicken des Ballens und die Schrägstellung der Lasteinleitungsplatte.

Tabelle 2.6: Physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse Kleinballen hochkant liegend ohne seitliche Einspannung

Proben-nummer	**Abmessungen (m)** l	b	h	**u (g/g)**	**ρ_{tr} (kg/m³)**	**σ_{10} (kN/m²)**	**σ_e kN/m²**	**ε_{40} (%)**	**ε_p (%)**	**E-Modul kN/m²**
1.1.2.1	0,800	0,360	0,480	0,153	69,53	18,00	15,00	29,32	-14,46	72,83
1.1.2.2	0,770	0,360	0,480	0,156	70,76	18,00	15,00	28,67	-11,28	91,37
1.1.2.3	0,760	0,360	0,480	0,150	71,64	19,00	18,00	28,34	-16,40	73,51
1.1.2.4	0,840	0,360	0,480	0,209	101,99	35,00	25,00	11,69	-3,93	213,95
1.1.2.5	0,820	0,360	0,480	0,164	112,14	38,00	45,00	10,71	-3,12	291,30
1.1.2.6	0,760	0,360	0,480	0,160	113,71	30,00	33,00	14,00	-3,45	264,08
Ø Ballen „locker“	0,777	0,360	0,480	0,153	70,64	18,33	16,00	28,78	-14,05	79,24
Ø Ballen „dicht“	0,807	0,360	0,480	0,178	109,28	34,33	34,33	12,14	-3,50	256,44

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte; σ_{10}: Spannung bei 10% Stauchung; σ_e: Spannung am Ende des Proportionalbereiches; ε_{40}: Stauchung bei einer Spannung von 40 kN/m²; ε_p: Nullpunktverschiebung; Ø Mittelwert aus den betreffenden Werten

2.2.2 Spannungs-Stauchungstests an HL HD-Ballen mit seitlicher Einspannung

Es wurde das Spannungs-Stauchungsverhalten von insgesamt 26 hochkant liegenden, unverputzten Kleinballen mit seitlicher Einspannung getestet. 17 davon bestanden aus Weizenstroh, je drei aus Roggen-, Gerste- und Dinkelstroh. Ein Test wurde an einer teilbelasteten Probe durchgeführt, zwei an halbierten und vier an halbierten, zusammengesetzten Ballen. Zum Testablauf siehe Teil II Abschnitt 3.4.2.1, *Spannungs-Stauchungsverhalten*.

Weizenballen
Es wurden insgesamt 10 hochkant liegende, seitlich eingespannte, unverputzte Weizenballen einem Spannungs-Stauchungstest unterzogen. 3 Tests wurden von Struwe im Rahmen seiner Diplomarbeit (Struwe 2007) durchge-

führt. Tabelle 2.2 listet physikalische Balleneigenschaften sowie Testergebnisse auf:

Beobachtungen
Während des Pressens ist in den Ballen ein Knistern zu vernehmen. Bei vielen Ballen, insbesondere bei den Ballen mit niedrigeren Dichten, wird ein starkes Schrägstellen der Lasteinleitungsplatte beobachtet. Dies schlägt sich in einem nicht-linearen Verlauf der Spannungs-Dehnungskurven, besonders deutlich zu beobachten bei Probe 1.9.4.2, die auch die geringste Trockendichte aufweist. Im Allgemeinen sind relativ lineare Ausprägungen der Kurven ab einer Spannung von ca. 5 kN/m² feststellbar. Auch hier haben dichtere Ballen in der Tendenz steilere Kurven.

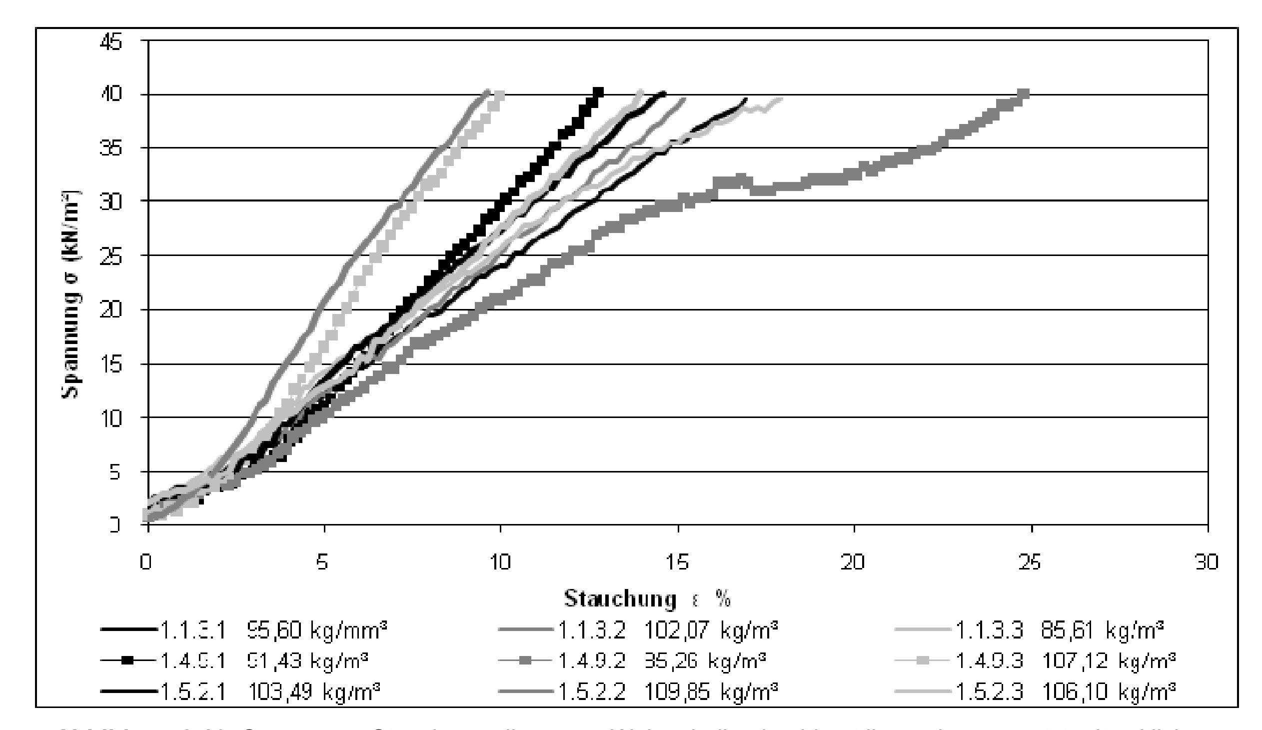


Abbildung 2.16: Spannungs-Stauchungsdiagramm Weizenballen hochkant liegend, unverputzt mit seitlicher Einspannung

Tabelle 2.7: Physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse Kleinballen flach liegend mit seitlicher Einspannung

Proben-nummer	Abmessungen (m) l	b	h	u (g/g)	ρ_{tr} (kg/m³)	σ_{10} (kN/m²)	σ_e kN/m²	ε_{40} (%)	ε_p (%)	E-Modul kN/m²
1.1.3.1	0,871	0,371	0,472	0,145	95,60	24,20	18,56	16,95	0,65	258,11
1.1.3.2	0,877	0,365	0,476	0,119	102,07	25,52	26,96	15,13	0,61	272,69
1.1.3.3	0,857	0,368	0,481	0,127	85,61	25,53	34,68	17,88	-1,74	212,86
1.4.9.1*	0,866	0,374	0,502	0,123	91,43	29,49	24,86	12,75	2,14	386,91
1.4.9.2*	0,835	0,369	0,489	0,120	85,26	20,89	28,76	24,74	0,23	210,29
1.4.9.3*	0,857	0,374	0,481	0,112	107,12	39,88	28,00	9,98	1,77	528,61
1.5.2.1	0,856	0,360	0,480	0,121	103,49	27,25	16,39	14,58	1,04	341,83
1.5.2.2	0,834	0,367	0,480	0,108	109,85	40,26	33,47	9,58	0,95	479,89
1.5.2.3	0,882	0,367	0,481	0,102	106,10	27,73	40,21	13,93	0,94	309,48
1.5.9.1	0,853	0,372	0,471	0,107	105,85	34,10	20,28	11,25	-0,23	397,02
Ø Ballen	0,859	0,369	0,481	0,118	99,238	29,486	27,217	14,678	0,636	339,769

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte; σ_{10}: Spannung bei 10% Stauchung; σ_e: Spannung am Ende des Proportionalbereiches; ε_{40}: Stauchung bei einer Spannung von 40 kN/m²; ε_p: Nullpunktverschiebung; Ø Mittelwert aus den betreffenden Werten; * Messungen im Rahmen der Diplomarbeit von Struwe (2007) durchgeführt.

Roggen, Gerste, Dinkel, Bohnen
Die Messungen wurden im Rahmen der Diplomarbeit von Struwe (2007) durchgeführt und in dieser Dissertation neu interpretiert. Tabelle 2.8 listet zusammengefasst physikalische Balleneigenschaften sowie Testergebnisse auf, Abbildung 2.18 visualisiert die Kennlinien, Ab-

bildung 2.17 zeigt einen Testballen in der Prüfvorrichtung nach dem Aufbringen der Last.

Beobachtungen
Im Folgenden werden die Beobachtungen wiedergegeben, die Timo Struwe während der Tests für seine Diplomarbeit gemacht (Struwe 2007: 59ff) hat. Ansonsten wurden lediglich die Rohdaten, wie sie durch die SPS des Prüfstandes ausgegeben werden, übernommen. Alle Daten wurden völlig neu interpretiert. Der E-Modul wurde nach der korrekten Formel ermittelt, die Ermittlung der Trockendichten basiert auf den Sorptionsisothermen und Formeln, die im Rahmen dieser Dissertation ermittelt bzw. entwickelt wurden. Interpretationen der Kennlinien stammen vom Verfasser.

Roggen
Struwe (2007:63) protokolliert, dass ausschließlich der Ballen Roggen 1 ohne sichtbare Winkelverzerrung getestet wurde. Dieser Ballen weist eine entsprechend höhere Linearität auf als die beiden anderen Roggenballen, bei denen leichte Winkelverzerrungen festgestellt wurden.
Abweichend von der Regel, dass dichtere Ballen steilere Spannungs-Stauchungskennlinien aufweisen, verhalten sich die hier getesteten Ballen umgekehrt.

Gerste
Bei allen drei Gerstenproben, so berichtet Struwe (2007:61), sei ein Durchbiegen der Halme an der Oberfläche der Ballen zu beobachten gewesen und es kam zu einer starken Winkelverzerrung. Diese Beobachtung spiegelt sich im Diagramm im Abknicken der Spannungs-Stauchungskennlinien oberhalb von 20 kN/m² wieder.
Auffällig ist, dass die Kurven der drei Gersteballen trotz des großen Dichteunterschiedes von fast 20 kg/m³ Trockenmasse vor dem Abknicken der Kennlinie sehr dicht zusammen liegen.

Dinkel
Bei den Dinkelballen, schreibt Struwe (2007: 65) bleibt nur Ballen Dinkel 1 unverzerrt, Ballen 2 wird leicht, Ballen 3 stark deformiert, wie auch aus den Kennlinien ersichtlich. Die Dinkelballen verhalten sich bezüglich der Dichte/Steilheit der Kennlinie regelkonform, wobei das Kennlinienfeld auch im Bereich vor dem Abknicken relativ weit auseinander gezogen ist.




Abbildung 2.17: Hochkant liegender Testballen nach dem Aufbringen der Last

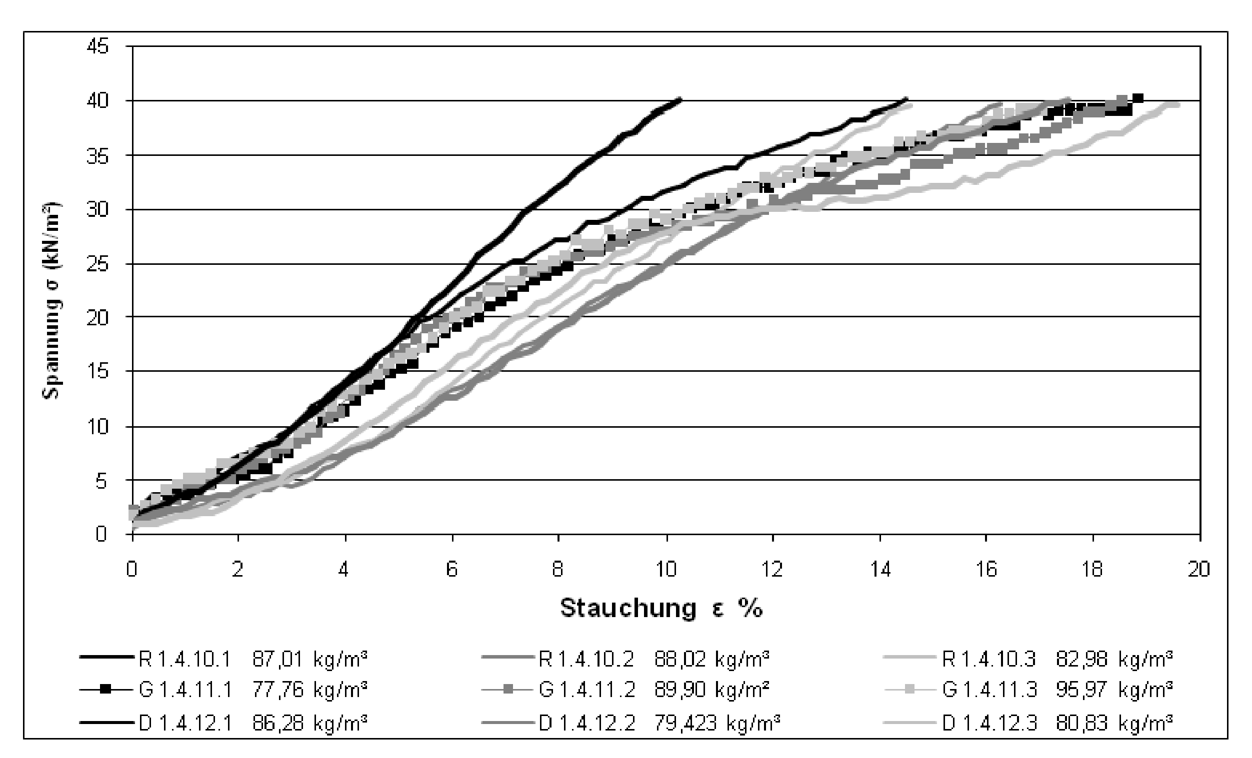


Abbildung 2.18: Spannungs-Stauchungskennlinien unverputzter Roggen-, Gerste- und Dinkelballen unverputzt, hochkant liegend mit Einspannung

Tabelle 2.8: Physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse Kleinballen hochkant liegend verschiedener Strohsorten unverputzt mit seitlicher Einspannung

Proben-nummer	Abmessungen (m)			u (g/g)	ρ_{tr} (kg/m³)	σ_{10} (kN/m²)	σ_e kN/m²	ε_{40} (%)	ε_p (%)	E-Modul kN/m²
	l	b	h							
R 1.4.10.1	0,993	0,367	0,504	0,127	87,00	31,60	19,56	14,48	0,53	405,04
R 1.4.10.2	0,973	0,367	0,504	0,110	88,02	24,81	28,37	16,27	1,67	300,65
R 1.4.10.3	1,016	0,364	0,508	0,128	82,98	27,15	23,35	14,57	2,09	355,35
Ø Roggen	0,994	0,366	0,505	0,122	86,000	27,852	23,760	15,107	1,431	353,677
G 1.4.11.1	0,681	0,353	0,478	0,115	77,76	29,18	18,61	18,83	0,86	372,54
G 1.4.11.2	0,670	0,361	0,491	0,098	89,90	28,04	18,98	18,53	1,44	467,65
G 1.4.11.3	0,661	0,364	0,481	0,108	95,97	29,15	27,23	17,05	0,45	346,09
Ø Gerste	0,671	0,359	0,483	0,107	87,875	28,790	21,607	18,137	0,919	395,426
D 1.4.12.1	0,870	0,370	0,479	0,144	86,28	39,35	29,68	10,23	0,99	469,77
D 1.4.12.2	0,944	0,369	0,496	0,126	79,42	25,44	26,10	17,54	2,16	321,28
D 1.4.12.3	0,883	0,373	0,475	0,134	80,83	27,95	19,89	19,58	1,53	353,41
Ø Dinkel	0,899	0,371	0,483	0,134	82,177	30,914	25,223	15,783	1,560	381,487

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte; σ_{10}: Spannung bei 10% Stauchung; σ_e: Spannung am Ende des Proportionalbereiches; ε_{40}: Stauchung bei einer Spannung von 40 kN/m²; ε_p: Nullpunktverschiebung; Ø Mittelwert aus den betreffenden Werten; R: Roggen; G: Gerste; D: Dinkel

2.2.3 Spannungs-Stauchungstests an HL, verputzten HD-Ballen mit seitlicher Einspannung

Es wurden insgesamt sechs hochkant liegende, seitlich eingespannte verputzte Weizenballen einem Spannungs-Stauchungstest unterzogen. Bei je 3 Weizenballen erfolgte die Lasteinleitung direkt (1.5.5.1-3) bzw. indirekt (1.5.4.1-3) in den Putz (zur Erläuterung siehe Teil 2 Abschnitt 3.4.2.6, *Spannungs-Stauchungstests an verputzen Strohballen*). Tabelle 2.9 listet physikalische Balleneigenschaften sowie Testergebnisse auf.

Beobachtungen

Das Spannungs-Stauchungsdiagramm (Abbildung 2.13) zeigt die ermittelten Kennlinien über den gesamten Messbereich. Unschwer lassen sich die Kurven der Ballen mit direkter und indirekter Lasteinleitung in den Putz unterscheiden. Die Kennlinien beider Gruppen weisen eine hohe Linearität auf, jedoch sind die Kurven der Ballen, bei denen die Last direkt in den Putz eingeleitet wird, deutlich steiler, d.h. der E-Modul ist höher als bei den Proben, bei welchen die Lasteinleitung in den Putz indirekt erfolgt.

Die Aufzeichnungen über die Massen der Proben 1.5.4.2 und 1.5.4.3 sind abhanden gekommen, sodass keine Rückschlüsse auf den Einfluss der Ballendichte auf die Spannungs-Stauchungskennlinien von verputzten Ballen bei indirekter Lasteinleitung gezogen werden können. Bei den Tests mit indirekter Lasteinleitung wird ein Eindrücken (Abbildung 2.20) der Lasteinleitungselemente in den Ballen und damit einhergehend ein Verlust der Putzhaftung in diesem Bereich festgestellt, die aber nicht zu Frakturen in der Putzoberfläche führt.

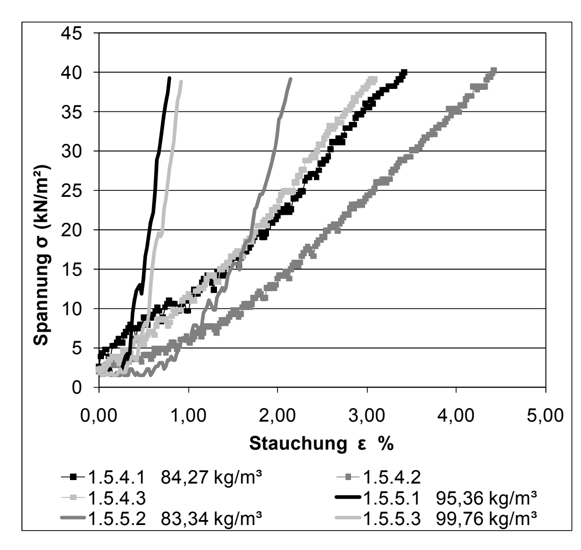


Abbildung 2.19: Spannungs-Stauchungsdiagramm verputzter Kleinballen hochkant liegend mit seitlicher Einspannung



Abbildung 2.20: Abdruck der Lasteinleitungselemente bei Probe 1.5.4.1

Bei der Probe 1.5.5.2 wurde bewusst auf den kraftschlüssigen Verbund durch Gips zwischen Putz und Lasteinleitungselementen verzichtet. Gut sichtbar ist, dass sich die Stauchung bis ca. 0,7% zunächst ohne wesentliche Spannungszunahme erhöht. Danach steigt die Kennlinie langsam an und erreicht bei einer Stauchung von ca. 1,7%, wenn die Lasteinleitungsplatte kraftschlüssig aufliegt, ihre maximale Steilheit. Bei keiner der Proben wurde ein Bruch des Putzes registriert.



Abbildung 2.21: Probe 1.5.5.3 vor der Belastung

Tabelle 2.9: Physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse Kleinballen hochkant liegend, verputzt mit seitlicher Einspannung

Proben-nummer	Abmessungen (m) l	b	h	u (g/g)	ρ_{tr} (kg/m³)	σ_{10} (kN/m²)	σ_e kN/m²	ε_{40} (%)	ε_p (%)	E-Modul kN/m²
1.5.4.1	0,809	0,360	0,460	0,141	84,28	/	26,66	3,41	0,28	1240,87
1.5.4.2	0,874	0,360	0,479	0,141	/	/	40,25	4,43	0,97	1164,04
1.5.4.3	0,911	0,360	0,480	0,105	/	/	23,66	3,08	0,41	1470,48
Ø indirekt	0,865	0,360	0,473	0,129	/	/	30,190	3,641	0,555	1291,795
1.5.5.1	0,807	0,360	0,480	0,105	95,36	/	39,24	0,79	0,35	8841,94
1.5.5.2	0,809	0,360	0,480	0,105	83,35	/	39,14	2,14	1,22	4240,35
1.5.5.3	0,816	0,360	0,480	0,105	99,76	/	38,83	0,92	0,50	9171,43
Ø direkt	0,811	0,360	0,480	0,105	92,822	/	39,070	1,285	0,687	7417,905

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte; σ_{10}: Spannung bei 10% Stauchung; σ_e: Spannung am Ende des Proportionalbereiches; ε_{40}: Stauchung bei einer Spannung von 40 kN/m²; ε_p: Nullpunktverschiebung; Ø Mittelwert aus den betreffenden Werten

2.2.4 Spannungs-Stauchungstests an HL, teilbelasteten HD-Ballen mit seitlicher Einspannung

Es wurde ein Ballen wie in Teil 2 Abschnitt 3.4.2.7, *Spannungs-Stauchungstests mit partiell belasteten, unverputzten Ballen*, beschrieben getestet. Tabelle 2.10 listet physikalische Balleneigenschaften sowie Testergebnisse auf.

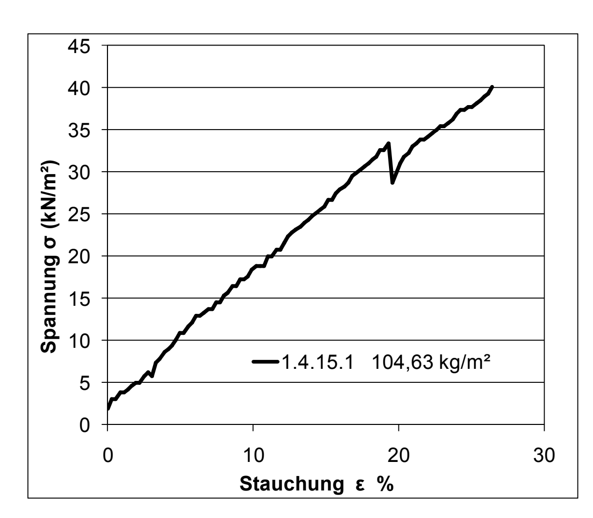


Abbildung 2.22: Spannungs-Stauchungsdiagramm unverputzter flach liegender teilbelasteter Weizenballen mit seitlicher Einspannung

Beobachtungen
Während des Pressens ist in den Ballen ein Knistern zu vernehmen. Es wird kein Reißen des Polypropylengarns verzeichnet. Es wird eine Winkelverzerrung über die Ballenlängs- und -querachse beobachtet. Der als Belastungselement verwendete Holzbalken drückt sich deutlich in das Stroh ein. Es kommt zu einer Verwindung des Ballens (siehe Abbildung 2.23)
Trotz der aufgetretenen Winkelverzerrung weißt die Spannungs-Stauchungskennlinie eine hohe Linearität auf. Warum es bei einer Stauchung von ca. 19% zu einem Spannungsabfall kommt, ist unbekannt.




Abbildung 2.23: Probe 1.4.15.1 nach Erreichen der Maximalspannung

Tabelle 2.10: Physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse Kleinballen hochkant liegend unverputzt, mit seitlicher Einspannung, teilbelastet

Proben-nummer	Abmessungen (m) l	b	h	u (g/g)	ρ_{tr} (kg/m³)	σ_{10} (kN/m²)	σ_e kN/m²	ε_{40} (%)	ε_p (%)	E-Modul kN/m²
1.4.15.1	0,806	0,363	0,473	0,095	104,63	18,42	33,41	26,45	-1,62	159,84

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte; σ_{10}: Spannung bei 10% Stauchung; σ_e: Spannung am Ende des Proportionalbereiches; ε_{40}: Stauchung bei einer Spannung von 40 kN/m²; ε_p: Nullpunktverschiebung; Ø Mittelwert aus den betreffenden Werten

2.2.4.1 Spannungs-Stauchungstests an HL, halbierten HD-Ballen mit seitlicher Einspannung

Es wurden die Strohproben 1.4.16.1-1.4.18.2 in sechs Tests wie in Teil II, Abschnitt 3.4.2.8, *Spannungs-Stauchungstests mit halbierten und zusammengesetzten halbierten, unverputzten Ballen mit seitlicher Einspannung*, beschrieben hinsichtlich ihres Spannungs-Stauchungsverhaltens untersucht.
Tabelle 2.11 listet zusammengefasst physikalische Balleneigenschaften sowie Testergebnisse auf, Abbildung 2.27 visualisiert die Kennlinien.




Abbildung 2.24: Probe 1.4.16.2 vor und nach dem Test

Beobachtungen

Alle Kennlinien weisen unabhängig von den Testbedingungen eine hohe Linearität und Ähnlichkeit zumindest im Bereich bis ca. 17 kN/m² auf. Bei allen Tests ist ein Knistern in den Proben zu vernehmen.
Bei Probe 1.4.16.2, die als halber Ballen geprüft wurde, kam es im Testverlauf zu Winkelverzerrungen über die Ballenlängsachse (Abbildung 2.24), in deren Folge die Spannungs-Stauchungskennlinie dieses Ballens bei ca. 20 kN/m² abknickt.

Die beiden Hälften der Proben 14.17.1 und 2 wurden jeweils aufeinander gestapelt getestet. Bei Ballen 1.4.17.1 kam es dabei zu Verzerrungen über beide Achsen. Über die Ballenquerachse war diese Winkelverzerrung besonders ausgeprägt. Besonders auffällig war das deutliche Ausbeulen und ein damit verbundenes Abknicken der Strohhalme dieser Probe im Bereich des Schnittes (Abbildung 2.25). Ein Abknicken der entsprechenden Kennlinie ab ca. 18 kN/m³ ist aus Abbildung 2.27 ersichtlich. Bei dieser Probe wird nur eine leichte Verzerrung über die Ballenquerachse und ein leichtes Ausbeulen der Probe im Schnittbereich an den schmalen Ballenseiten beobachtet.




Abbildung 2.25: Probe 1.4.17.1 vor- und verbiegen der Strohhalme nach dem Test

Zwischen beiden Hälften der Proben 14.18.1 und 2, die jeweils aufeinander gestapelt wurden, wurde ein Blech eingelegt, welches ein Eindrücken der Halme beider Hälften ineinander ausschließt.
Bei Probe 1.4.18.1 ist eine leichte Verzerrung über die Ballenquerachse und Verzerrung über die Ballenlängsachse sowie minimales Ausbeulen an den Ballenschmalseiten im Bereich des Schnittes beobachtet worden. Diese Effekte sind in der Spannungs-Stauchungskennlinie nicht sichtbar.
Bei Probe 1.4.18.2 fand eine Winkelverzerrung über beide Achsen und ein minimales Ausbeulen an den Ballenschmalseiten im Bereich des Schnittes statt. Auffällig ist bei dieser Probe eine deutliche Deformation des Stahlbleches zwischen den Ballenhälften (vgl. Abbildung 2.26). Die Kennlinie dieser Probe wird ab ca. 16 kN/m² leicht abgelenkt.




Abbildung 2.26: Probe 1.4.18.2 vor und nach dem Test

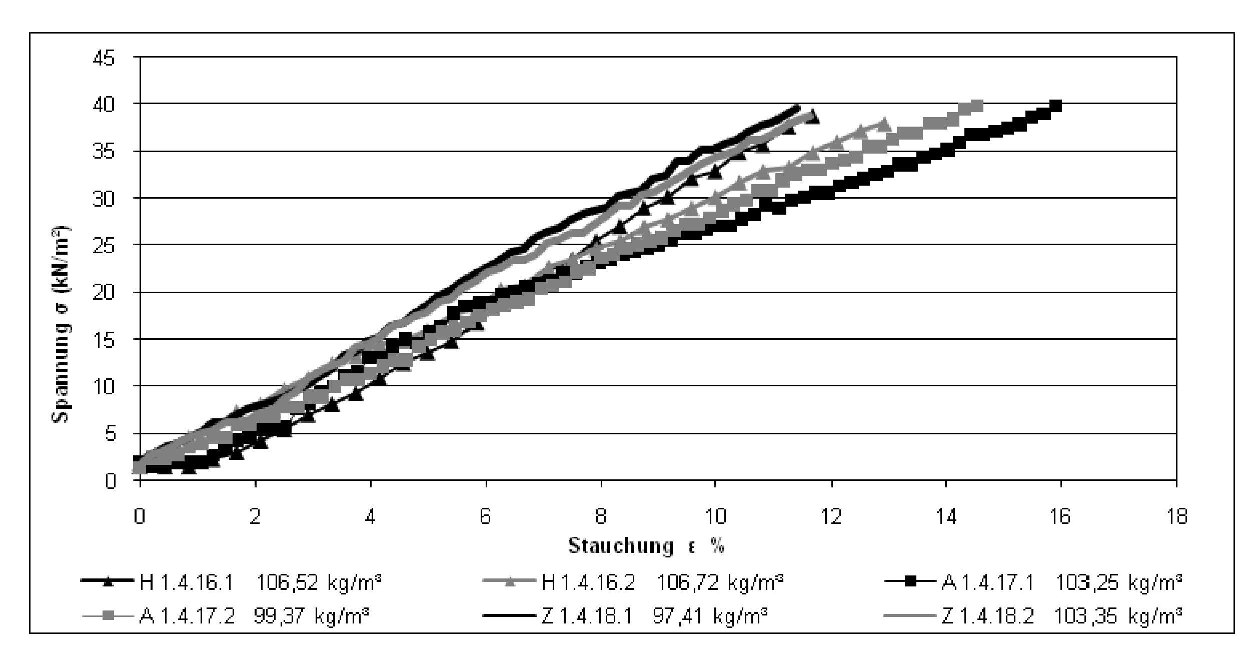


Abbildung 2.27: Spannungs-Stauchungsdiagramm unverputzter flach liegender halbierter Weizenballen mit seitlicher Einspannung

Tabelle 2.11: Physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse halbierter Weizenballen hochkant liegend unverputzt mit seitlicher Einspannung

Proben-nummer	**Abmessungen (m)**			**u (g/g)**	**ρ_{tr} (kg/m³)**	**σ_{10} (kN/m²)**	**σ_e kN/m²**	**ε_{40} (%)**	**ε_p (%)**	**E-Modul kN/m²**
	l	**b**	**h**							
H 1.4.16.1	0,805	0,183	0,480	0,110	106,52	32,90	16,08	11,67	0,74	316,00
H 1.4.16.2	0,805	0,183	0,480	0,110	106,52	30,15	12,48	12,92	-0,64	314,00
Ø H	0,805	0,183	0,480	0,110	106,52	31,529	14,280	12,292	0,048	315,000
A 1.4.17.1	0,823	0,362	0,478	0,110	103,25	27,03	19,67	15,90	0,55	343,41
A 1.4.17.2	0,878	0,366	0,475	0,112	99,37	28,65	15,00	14,53	-0,11	290,78
Ø A	0,851	0,364	0,477	0,111	101,31	27,838	17,335	15,213	0,222	317,096

Z 1.4.18.1	0,834	0,370	0,483	0,114	97,41	35,07	24,22	11,39	0,26	392,90
Z 1.4.18.2	0,851	0,370	0,482	0,106	103,54	34,37	23,37	11,62	-0,33	345,78
Ø Z	0,843	0,370	0,483	0,110	100,48	34,719	23,795	11,503	-0,037	369,340

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte; σ_{10}: Spannung bei 10% Stauchung; σ_e: Spannung am Ende des Proportionalbereiches; ε_{40}: Stauchung bei einer Spannung von 40 kN/m²; ε_p: Nullpunktverschiebung; Ø Mittelwert aus den betreffenden Werten; H: Probe ist ein halber Ballen A: Probe sind zwei aufeinander gestapelte halbe Ballen; E: Probe sind zwei aufeinander gestapelte halbe Ballen mit einer Einlage aus Blech

2.2.5 Spannungs-Stauchungstests an HL, unverputzten Quaderballen aus Weizenstroh mit seitlicher Einspannung

Es wurden drei Spannungs-Stauchungstests an hochkant liegenden Quaderballen aus Weizenstroh durchgeführt. Die Versuchsdurchführung erfolgte wie Teil II Abschnitt 3.4.3, *Tests mit dem Q-Ballen Kombiprüfstand*, beschrieben. Tabelle 2.8 listet zusammengefasst physikalische Balleneigenschaften sowie Testergebnisse auf. Abbildung 2.28 visualisiert die aufgenommenen Daten. Abbildung 2.29 zeigt einen Quaderballen während des Tests und das beschädigte Joch, s.u..

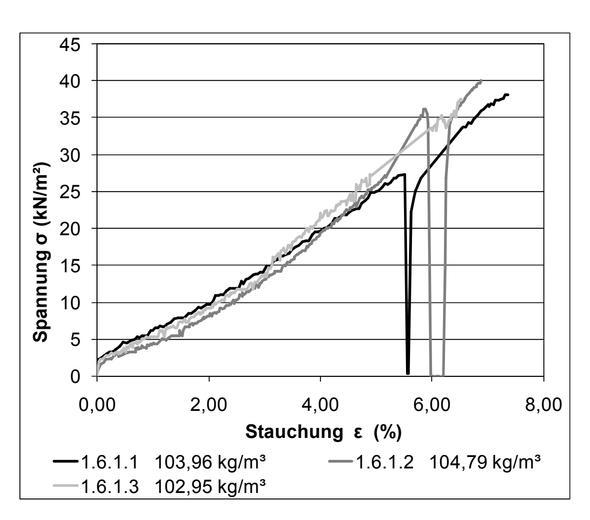


Abbildung 2.28: Spannungs-Stauchungskennlinien unverputzter Roggen-, Gerste- und Dinkelballen unverputzt, hochkant liegend mit Einspannung

Beobachtungen

Bei allen drei Proben wurde eine minimale, optisch nicht auffallende Winkelverzerrung festgestellt. Alle Kennlinien weisen eine gute Linearität bis zu einer Spannung von ca. 27 kN/m² auf. Die Einbrüche der Spannung bei den Proben 1.6.1.1 und 1.6.1.2 sind durch den Versuchsablauf, nämlich durch das Umsetzen der Hydraulikzylinder bedingt. Bei Probe 1.6.1.3 liegt dieses Ereignis außerhalb des dargestellten Bereiches. Ein Zusammenhang zwischen der Trockendichte der Proben, welche einander ausgesprochen ähnlich sind und der Steilheit der Kennlinien ist nicht evident.





Abbildung 2.29: Großballen 1.6.1.1 während des Tests und Beschädigung am Hauptjoch

Tabelle 2.12: Physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse Quaderballen aus Weizenstroh hochkant liegend, unverputzt mit seitlicher Einspannung

Proben-nummer	Abmessungen (m)			u (g/g)	ρ_{tr} (kg/m³)	σ_{10} (kN/m²)	σ_e kN/m²	ε_{40} (%)	ε_p (%)	E-Modul kN/m²
	l	b	h							
1.6.1.1	2,272	0,850	1,247	0,110	103,96	/	26,88	/	-0,08	499,02
1.6.1.2	2,244	0,850	1,255	0,124	104,79	/	27,42	6,87	1,00	652,48
1.6.1.3	2,294	0,850	1,269	0,115	102,95	/	35,37	/	0,71	647,81
Ø 1.6.1	2,270	0,850	1,257	0,117	103,90	0,000	29,890	2,291	0,544	599,769

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte; σ_{10}: Spannung bei 10% Stauchung; σ_e: Spannung am Ende des Proportionalbereiches; ε_{40}: Stauchung bei einer Spannung von 40 kN/m²; ε_p: Nullpunktverschiebung; Ø Mittelwert aus den betreffenden Werten

2.3 Spannungs-Stauchungstests an stehenden Strohballen

Getestet wurde das Spannungs-Stauchungsverhalten von drei stehenden, unverputzten Weizenstrohballen (Probennummern 1.5.3.2-1.5.3.3) ohne seitliche Einspannung bis zu einer Endspannung von 20 kN/m² wie in Teil II, Abschnitt 3.4.2.1, *Spannungs-Stauchungsverhalten*, beschrieben. Tabelle 2.13 listet physikalische Balleneigenschaften sowie Testergebnisse auf. Abbildung 2.30 visualisiert die aufgenommenen Daten.

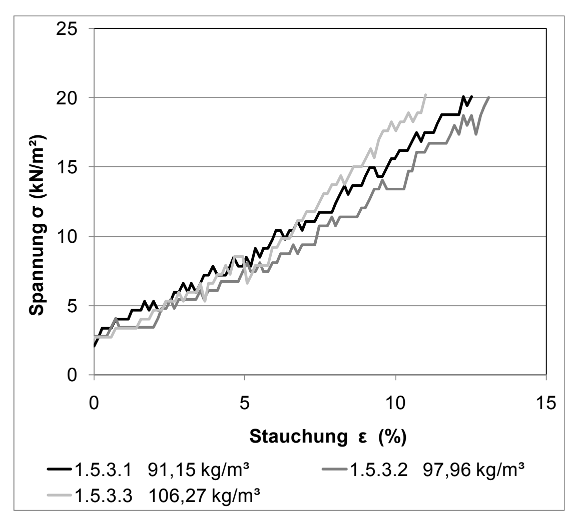


Abbildung 2.30: Spannungs-Stauchungsdiagramm Weizenballen stehend, unverputzt ohne seitliche Einspannung

Beobachtungen

Durch das Komprimieren des Ballens während des Tests entspannten sich die Garnbindungen (siehe Abbildung 2.31). Aus der geringen Fläche, die bei stehenden Ballen belastet wird, resultiert eine geringe Presskraft und damit eine schlechtere Auflösung der Ergebnisse, was in den Schwankungen der Verformungskennlinien sichtbar wird und die Auswertung erschwert.

Die Ballen erwiesen sich beim Testen deutlich labiler als flach- und hochkant liegende Ballen. Die Ballenbindungen wurden durch das Zusammenpressen der Ballen vollständig entspannt und trugen somit nicht mehr zur Stabilität des Ballens bei.

Bei Probe 1.5.3.1 wurde eine Winkelverzerrung über beide Achsen registriert, bei Probe 1.5.3.2 eine Winkelverzerrung parallel zur Faserrichtung. Probe 1.5.3.3 blieb nahezu unverzerrt. Dieser Ballen weist den höchsten E-Modul und die höchste Trockendichte auf. Bezüglich Dichte und E-Modul bzw. Steilheit der Kennlinien ist keine Tendenz erkennbar.





Abbildung 2.31: Probe 1.5.3.1 vor dem Test und entspanntes Ballengarn nach dem Test (Probe 1.5.3.3)

Tabelle 2.13: Physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse HD-Ballen aus Weizenstroh stehend ohne seitliche Einspannung

Proben-nummer	Abmessungen (m)			u (g/g)	ρ_{tr} (kg/m³)	σ_{10} (kN/m²)	σ_e kN/m²	ε_{40} (%)	ε_p (%)	E-Modul kN/m²
	l	b	h							
1.5.3.1	0,710	0,489	0,367	0,121	91,15	15,55	20,06	/	0,51	166,71
1.5.3.2	0,691	0,482	0,361	0,107	97,96	13,39	16,41	/	0,88	151,86
1.5.3.3	0,671	0,480	0,371	0,110	106,27	17,62	15,67	/	1,41	198,72
Ø Ballen	0,691	0,484	0,366	0,113	98,459	15,521	17,380	/	0,935	172,430

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte; σ_{10}: Spannung bei 10% Stauchung; σ_e: Spannung am Ende des Proportionalbereiches; ε_{40}: Stauchung bei einer Spannung von 40 kN/m²; ε_p: Nullpunktverschiebung; Ø Mittelwert aus den betreffenden Werten

3 Untersuchung der Querdehnung bei nicht eingespannten Einzelballen

Während der Spannungs-Stauchungstests an flach- und hochkant liegenden, nicht eingespannten Strohballen wurden bei 11 Proben die Prüfkörperlänge alle 5 kN Spannungsanstieg gemessen und so die Querdehnung aufgenommen.
Die physikalischen Daten der entsprechenden Proben können 0 und 2.2.1 entnommen werden.

Abbildung 3.1 zeigt die Querdehnung aller flach liegenden Proben in Abhängigkeit von der Spannung. Zusätzlich wurde der Mittelwert der unterschiedlichen Dichtegruppen gebildet und aufgetragen.

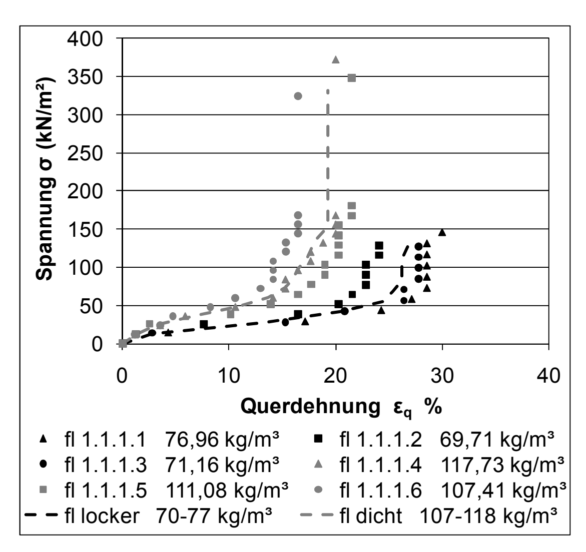


Abbildung 3.1: Spannung-Querdehnung flach liegender HD-Weizenballen ohne Einspannung

Deutlich erkennbar ist, dass die Proben der Gruppe höherer Dichte eine deutlich geringere Querdehnung aufweisen, als jene der Gruppe geringerer Dichte.
Die Datenpunkte der lockeren Ballen brechen unterhalb von 150 kN/m² ab, da in diesem Bereich der maximal fahrbare Weg der Prüfeinrichtung erreicht wurde.
Kennlinien der Mittelwerte beider Gruppen weisen in ihrer Querdehnung ein ähnliches Verformungsbild auf wie in ihrer Längsstauchung. Zunächst erfolgt ein steiler Anstieg, der in einer zweiten Phase abflacht und in einer dritten deutlich ansteigt. Ab einer Spannung von ca. 160 kN/m² ist bei der Gruppe der dichten Ballen keine weitere Querdehnung zu registrieren.
Abbildung 3.2 zeigt die Querdehnung aller hochkant liegenden Proben in Abhängigkeit von der Spannung. Zusätzlich wurde der Mittelwert der unterschiedlichen Dichtegruppen gebildet und aufgetragen.

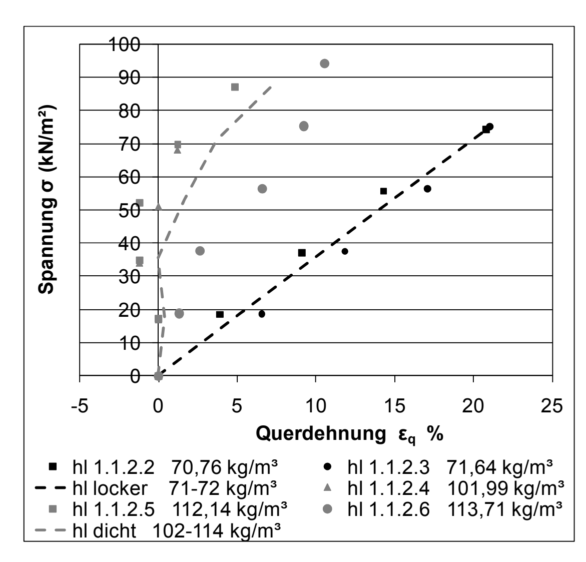


Abbildung 3.2: Spannung-Querdehnung hochkant liegender HD-Weizenballen ohne seitliche Einspannung

Deutlich erkennbar ist die geringere Stauchung der Ballen der Gruppe mit höherer Dichte im Vergleich zu der Gruppe der Ballen mit geringerer Dichte. Auffällig sind zwei Dinge: 1. Die mittlere Querdehnung aus der Gruppe der weniger dichten Ballen ist linear. 2. Bei zwei Proben der Gruppe der Proben hoher Dichte ist die Querdehnung im Bereich zwischen 20 und 60 kN/m² negativ. Es liegt also eine Querstauchung infolge einer Längsstauchung vor.

4 Tests zum Wiederausdehnungsverhalten von HD-Weizenballen

Um Hinweise auf das Verhalten von Strohballen nach dem Entfernen der Last im Anschluss an eine Kurzzeitbelastung bis zu einer Spannung von 40 kN/m² zu erhalten, wurden je drei Tests mit hochkant- und flach liegenden seitlich eingespannten HD-Weizenballen wie in Teil II Abschnitt 3.4.2.10, *Wiederausdehnungstests mit dem HD-Ballen Kombiprüfstand*, beschrieben durchgeführt.

4.1 Tests zum Wiederausdehnungsverhalten von flach liegenden Ballen

Abbildung 4.1 zeigt das Prolongationsverhalten seitlich eingespannter flach liegender HD-Weizenballen über 6 h. Die Dehnung von 100% entspricht der Stauchung, die aus einer Spannung von 40 kN/m² resultiert, welche in einem vorangehenden Spannungs-Stauchungstest aufgebracht wurde.
Aus der Grafik ist ersichtlich, dass alle Kennlinien ähnlich sind und nahe beieinander liegen. In den ersten Sekunden und Minuten ist ein starkes Wiederausdehnen der Proben zu erkennen. Nach ca. einer viertel Stunde kann keine weitere Dehnung beobachtet werden. Es ist kein Zusammenhang zwischen dem Maß der Dehnung und der Ballendichte ersichtlich. Informationen zu den vorhergehenden Spannungs-Stauchungstests und zu weiteren Daten siehe 1.1.1

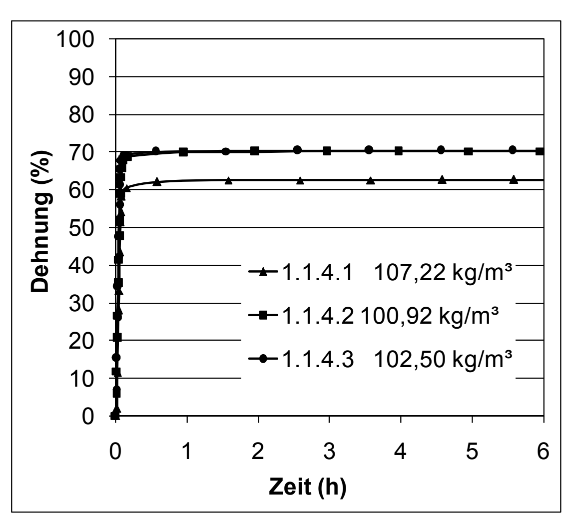


Abbildung 4.1: Prolongationsverhalten flach liegender HD-Weizenballen mit seitlicher Einspannung

4.2 Tests zum Wiederausdehnungsverhalten von hochkant liegenden Ballen

Abbildung 4.2 zeigt das Prolongationsverhalten seitlich eingespannter hochkant liegender HD-Weizenballen über 6 h. Die Dehnung von 100% entspricht der Stauchung, die aus einer Spannung von 40 kN/m² resultiert, welche in einem vorangehenden Spannungs-Stauchungstest aufgebracht wurde.
Aus der Grafik ist ersichtlich, dass alle Kennlinien ähnlich sind und nah beieinander liegen. In den ersten Sekunden und Minuten ist ein starkes Wiederausdehnen der Proben zu erkennen. Nach ca. einer viertel Stunde ist dieses Wiederausdehnen nahezu abgeschlossen. Es ist kein Zusammenhang zwischen dem Maß der Dehnung und der Ballendichte ersichtlich. Informationen zu den vorhergehenden Spannungs-Stauchungstests und zu weiteren Daten siehe 1.1.1.

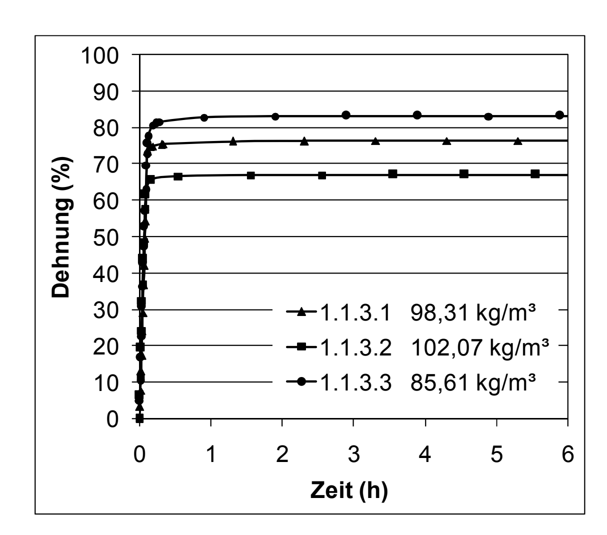


Abbildung 4.2: Prolongationsverhalten hochkant liegender HD-Weizenballen mit seitlicher Einspannung

5 Untersuchung des Relaxationsverhaltens von Einzelballen

Das Relaxationsverhalten von Strohballen wurde im Rahmen dieser Dissertation in 99 Tests untersucht. Es fanden Tests mit flach und hochkant liegenden sowie stehenden HD-Ballen unterschiedlicher Strohsorten, mit und ohne Einspannung, verputzt und unverputzt statt. Drei Tests wurden an hochkant liegenden Großballen durchgeführt.
Zum Einsatz kamen zwei unterschiedliche Testverfahren, welche in Teil II, Kapitel 3.4 beschrieben sind.
Die Tests nach dem ersten Verfahren (Kombitest), nach welchem 64 Strohballen getestet wurden, schlossen sich an Spannungs-Stauchungstests mit den Kombiprüfständen an. Diese Tests wurden an flach und hochkant liegenden Ballen mit einer Startspannung von 40, an stehenden Ballen mit 20 kN/m² durchgeführt. Die Tests an flach liegenden und hochkant liegenden Ballen wurden teilweise von Struwe im Rahmen seiner Diplomarbeit (Struwe 2007) durchgeführt.
Nach dem zweiten Verfahren (Langzeittest) wurden 35 HD-Weizenballen mit Startspannungen von 10, 20, 40 und 60 kN/m² getestet. Bei diesem Verfahren, bevor die eigentliche Relaxationsmessung begann, wurde die Spannung jeweils im Abstand von 10 Minuten sechs mal wieder auf den Wert der Startspannung erhöht. Der Spannungsabbau wurde über bis zu 80 Tagen gemessen.

5.1 Untersuchungen zum Relaxationsverhalten von flach liegenden Ballen

Es wurden insgesamt 43 Tests an flach liegenden HD-Ballen durchgeführt. Untersucht wurden verputzte und unverputzte, eingespannte und nicht eingespannte Ballen aus Weizen-, Roggen-, Gersten-, Dinkel- und Bohnenstroh sowie Hanf, Switchgras und Miscanthus. Tests mit verputzten und unverputzten Ballen und unterschiedlichen Strohsorten wurden mit Verfahren 1 (29 HD-Ballen) mit einer Startspannung von 40 kN/m² über 24 bzw. 72 Stunden untersucht. Dabei wurden auch die Auswirkungen von Garnrissen und Wasserschäden untersucht. 14 HD-Weizenballen wurden mit Verfahren 2 bei Startspannungen von 10, 20, 40 und 60 kN/m³ mit und ohne seitliche Einspannung über einen Zeitraum von bis zu einem Monat untersucht.

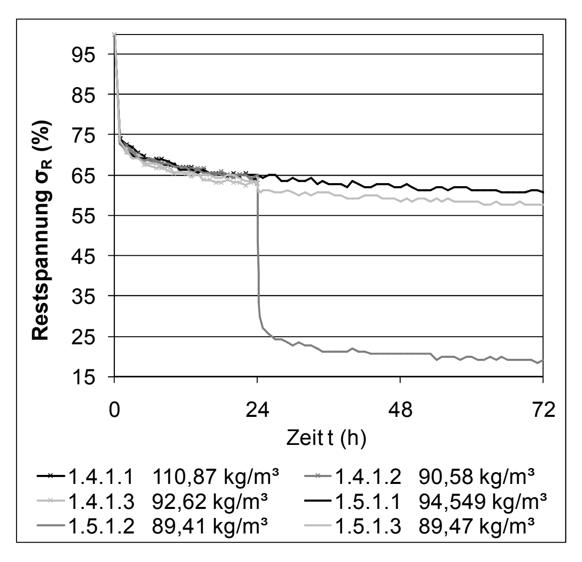


Abbildung 5.1: Relaxationsdiagramm flach liegender unverputzter HD-Weizenballen mit seitlicher Einspannung im Kombitest ausgehend von einer Startspannung von 40 kN/m³

5.1.1 Untersuchung unverputzter HD-Ballen im Kombitest

Es wurde das Relaxationsverhalten von insgesamt 25 flach liegenden, unverputzten, Kleinballen mit seitlicher Einspannung getestet. Sechs davon bestanden aus Weizenstroh, je drei aus Gerste-, Dinkel- und Bohnenstroh, zwei aus Hanffasern und einer aus Switchgras. Zum Testablauf siehe Teil II Abschnitte 3.4.2.2-3.4.2.4.

Weizenballen
Es wurden insgesamt sechs flach liegende, seitlich eingespannte, unverputzte Weizenballen einem Relaxationstest unterzogen. Tabelle 5.1 listet physikalische Balleneigenschaften sowie Testergebnisse auf.

Das Relaxationsdiagramm (Abbildung 5.1) zeigt die ermittelten Kennlinien über den gesamten Messbereich. Es ist erkennbar, dass alle Kennlinien unabhängig von der Trockendichte zunächst relativ eng zusammen liegen. Nach 24 Stunden wurden die Garnbänder von Probe 1.5.1.3 durchtrennt. Daraus resultiert ein spontanes, leichtes Absacken der Spannung. Zum gleichen Zeitpunkt wurde Probe 1.5.1.2 unter Wasser gesetzt. Die Spannung bricht spontan deutlich ein und stabilisiert sich in der Folge auf niedrigem Niveau. Ein Zusammenhang zwischen Trockendichte und Relaxation ist nicht evident.

Tabelle 5.1: Physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse HD-Weizenballen flach liegend mit seitlicher Einspannung

Proben-nummer	Abmessungen (m)			u (g/g)	ρ_{tr} (kg/m³)	σ_{R24} (%)
	l	b	h			
1.4.1.1*	0,838	0,480	0,360	0,126	110,87	63,98
1.4.1.2*	0,838	0,480	0,360	0,126	90,58	62,98
1.4.1.3*	0,821	0,481	0,370	0,129	92,62	63,17
1.5.1.1	0,847	0,480	0,360	0,124	94,55	64,95
1.5.1.2	0,852	0,480	0,360	0,140	89,41	64,95
1.5.1.3	0,839	0,480	0,360	0,118	89,47	62,80
Ø Ballen	0,839	0,480	0,362	0,127	94,58	63,81

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte; σ_{R24}: Restspannung nach 24 Stunden; Ø Mittelwert aus den betreffenden Werten; * Messungen im Rahmen der Diplomarbeit von Struwe (2007) durchgeführt

Gersten- und Dinkelballen

Es wurden je 3 flach liegende, seitlich eingespannte, unverputzte HD-Gersten- und Dinkelstrohballen einem Relaxationstest unterzogen. Diese Tests wurden von Struwe (2007) im Rahmen seiner Diplomarbeit durchgeführt, die Daten wurden in der vorliegenden Dissertation neu interpretiert. Tabelle 5.2 listet physikalische Balleneigenschaften sowie Testergebnisse auf.

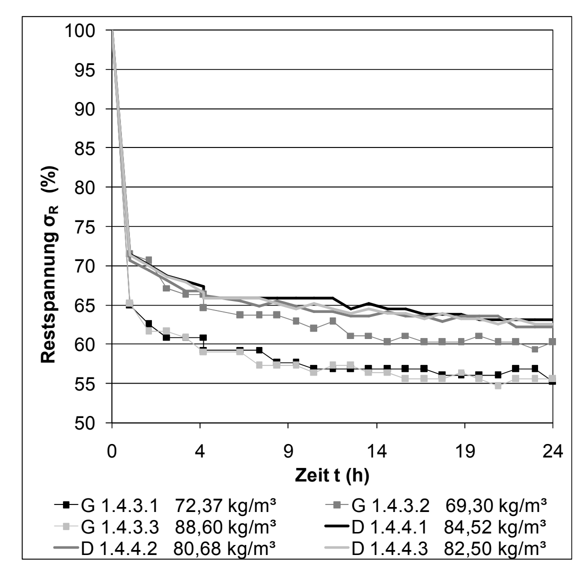


Abbildung 5.2: Relaxationsdiagramm flach liegender unverputzter HD-Gersten- und Dinkelballen mit seitlicher Einspannung im Kombitest ausgehend von einer Startspannung von 40 kN/m²

Das Relaxationsdiagramm (Abbildung 5.2) zeigt die ermittelten Kennlinien über den gesamten Messbereich. Es ist erkennbar, dass die Kennlinien der Dinkelballen sehr eng zusammen liegen. Bei den Kennlinien der Gerstenproben liegt 1.4.3.2, obwohl weniger dicht, deutlich höher als die beiden anderen Gerstenproben.

Bohnen-, Hanf- und Switchgrasballen

Es wurden drei flach liegende, seitlich eingespannte, unverputzte HD-Bohnenstroh, zwei Hanf- und 1 Switchgrasballen einem Relaxationstest unterzogen. Diese Tests wurden von Struwe (2007) im Rahmen seiner Diplomarbeit durchgeführt, die Daten wurden in der vorliegenden Dissertation neu interpretiert. Tabelle 5.3 listet physikalische Balleneigenschaften sowie Testergebnisse auf.

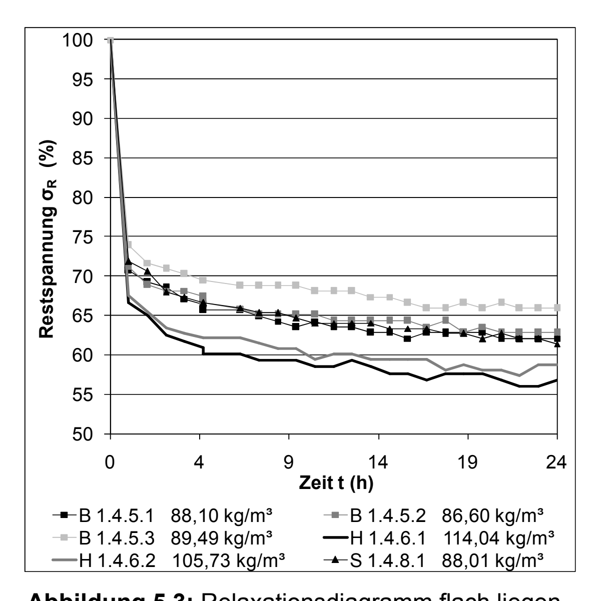


Abbildung 5.3: Relaxationsdiagramm flach liegender unverputzter HD-Gersten- und Dinkelballen mit seitlicher Einspannung im Kombitest ausgehend von einer Startspannung von 40 kN/m³

Das Relaxationsdiagramm (Abbildung 5.3) zeigt die ermittelten Kennlinien über den gesamten Messbereich. Auffällig ist die trotz ihrer hohen Dichte hohe Relaxation der Hanfballen. Bohnenstroh und Switchgrasballen, die in einem ähnlichen Trockendichtebereich liegen, weisen ähnliche Kurvenverläufe auf.

Tabelle 5.2: Physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse HD-Gersten- und Dinkelballen flach liegend mit seitlicher Einspannung

Proben-nummer	Abmessungen (m) l	b	h	u (g/g)	ρ_{tr} (kg/m³)	σ_{R24} (%)
G 1.4.3.1	0,708	0,499	0,369	0,153	72,37	55,21
G 1.4.3.2	0,699	0,483	0,368	0,170	69,30	60,27
G 1.4.3.3	0,694	0,483	0,368	0,145	88,60	55,57
Ø Gerste	0,700	0,488	0,368	0,156	76,756	57,02
D 1.4.4.1	0,870	0,479	0,368	0,147	84,52	63,14
D 1.4.4.2	0,913	0,482	0,371	0,147	80,68	62,28
D 1.4.4.3	0,888	0,475	0,366	0,134	82,45	62,52
Ø Dinkel	0,890	0,479	0,368	0,143	82,550	62,65

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte; σ_{R24}: Restspannung nach 24 Stunden; G: Proben aus Gerstenstroh; D: Proben aus Dinkelstroh; Ø Mittelwert aus den betreffenden Werten

Tabelle 5.3: Physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse HD-Gersten- und Dinkelballen flach liegend mit seitlicher Einspannung

Proben-nummer	Abmessungen (m) l	b	h	u (g/g)	ρ_{tr} (kg/m³)	σ_{R24} (%)
B 1.4.5.1	0,824	0,488	0,366	0,143	88,10	62,09
B 1.4.5.2	0,794	0,346	0,476	0,144	86,60	62,81
B 1.4.5.3	0,832	0,354	0,474	0,150	89,49	65,88
Ø Bohne	0,817	0,396	0,439	0,146	88,06	63,59
H 1.4.6.1	0,705	0,323	0,498	0,122	114,04	56,83
H 1.4.6.2	0,834	0,341	0,509	0,135	105,73	58,72
Ø Hanf	0,770	0,332	0,504	0,129	109,88	57,78
S 1.4.8.1	0,883	0,400	0,503	0,080	88,01	61,39

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte; σ_{R24}: Restspannung nach 24 Stunden; B: Proben aus Bohnenstroh; H: Proben aus Hanffasern; S: Probe aus Switchgras; Ø Mittelwert aus den betreffenden Werten

5.1.2 Untersuchung verputzter HD-Weizenballen im Kombitest

Es wurde das Relaxationsverhalten von insgesamt sechs flach liegenden, verputzten HD-Weizenballen mit seitlicher Einspannung getestet. Dabei wurde die Last bei drei Ballen indirekt und bei 3 Ballen direkt in den Putz eingeleitet. Je Lasteinleitungsart wurden bei einem Test ein Wasserschaden und ein Garnausfall simuliert. Zum Testablauf siehe Teil II Abschnitte 3.4.2.2-3.4.2.4.
Tabelle 5.4 listet physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse auf.

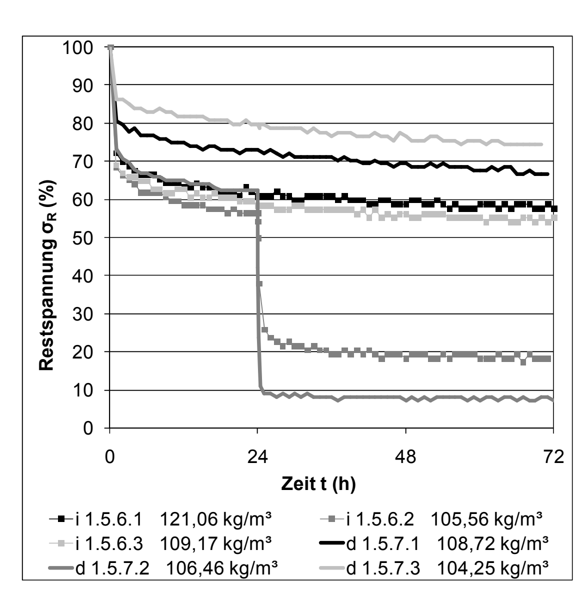


Abbildung 5.4: Relaxationsdiagramm verputzter flach liegender HD-Weizenballen mit seitlicher Einspannung im Kombitest ausgehend von einer Startspannung von 40 kN/m²

Das Relaxationsdiagramm (Abbildung 5.4) zeigt die ermittelten Kennlinien über den gesamten Messbereich. Die Ballen, bei denen der Putz direkt belastet wurde, zeigen eine geringere Relaxation. Bei Ballen 1.5.6.3 und 1.5.7.3 wurden die Garnbänder nach 24 Stunden durchtrennt. Ein Effekt ist aus dem Diagramm nicht erkennbar. Ballen 1.5.6.2 und 1.5.7.2 wurden nach 24 Stunden unter Wasser gesetzt. Die Spannung bricht bei beiden Proben spontan und deutlich ein, stabilisiert sich jedoch bei dem indirekt belasteten Ballen früher als bei dem direkt belasteten Ballen. Das Zuführen des Wassers hat bei beiden Proben eine sofortige Zerstörung der Putzschicht im wasserberührenden Bereich zur Folge, siehe Abbildung 5.5. Ein Zusammenhang zwischen Trockendichte und Relaxation ist nicht evident.



Abbildung 5.5: Zerstörung des Putzes durch Wasser bei Probe 1.5.7.2

Tabelle 5.4: Physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse verputzter HD-Weizenballen flach liegend mit seitlicher Einspannung

Proben-nummer	Abmessungen (m)			u (g/g)	ρ_{tr} (kg/m³)	σ_{R24} (%)
	l	b	h			
i 1.5.6.1	0,803	0,372	0,335	0,141	121,06	61,01
i 1.5.6.2	0,826	0,368	0,367	0,114	105,57	56,42
i 1.5.6.3	0,845	0,375	0,360	0,145	109,17	58,41
Ø indirekt	0,825	0,372	0,354	0,134	111,93	58,61
d 1.5.7.1	0,846	0,364	0,377	0,122	108,72	73,09
d 1.5.7.2	0,828	0,377	0,372	0,145	106,46	62,31
d 1.5.7.3	0,816	0,330	0,368	0,125	104,25	79,74
Ø direkt	0,830	0,357	0,372	0,131	106,48	71,71
u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte; σ_{R24}: Restspannung nach 24 Stunden; i: indirekte Lasteinleitung; d: direkte Lasteinleitung in den Putz; Ø Mittelwert aus den betreffenden Werten						

5.1.3 Untersuchung unverputzter HD-Weizenballen im Langzeittest

Im Langzeittest wurde das Relaxationsverhalten von 14 flach liegenden HD- Weizenballen untersucht. Zwei Tests wurden ohne Einspannung bei einer Startspannung von 40 kN/m² durchgeführt, je drei Tests an eingespannten Ballen mit Startspannungen von 10, 20, 40 und 60 kN/m². Zum Testablauf siehe Teil II, Kapitel 3.4.4, Tests mit den Relaxationsprüfständen.

5.1.3.1 Nicht eingespannte HD-Weizenballen, σ_S = 40 kN/m²

Es wurden insgesamt zwei flach liegende, seitlich nicht eingespannte, unverputzte Weizenballen einem Langzeit-Relaxationstest unterzogen. Tabelle 5.5 listet physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse auf.

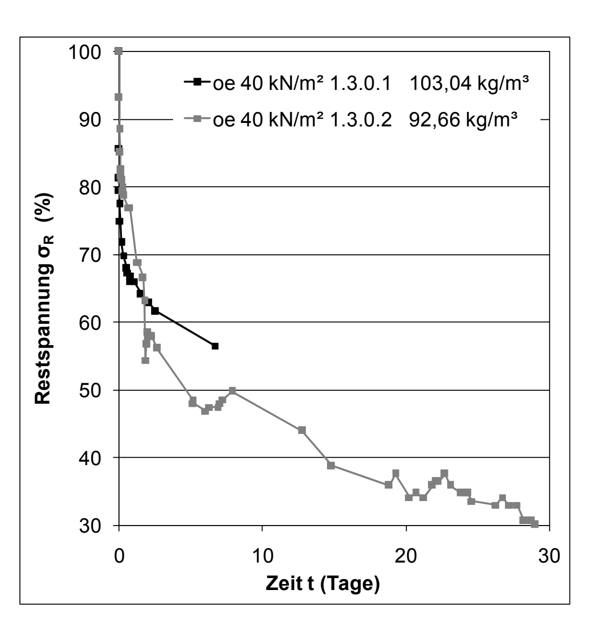


Abbildung 5.6: Relaxationsdiagramm flach liegender unverputzter HD-Weizenballen ohne seitliche Einspannung im Langzeittest σ_S = 40 kN/m²

Das Relaxationsdiagramm (Abbildung 5.6) zeigt die ermittelten Kennlinien über den ge-

samten Messbereich. Die Kennlinien unterscheiden sich deutlich. Die der Probe 1.3.02. mit der geringeren Trockendichte weist eine höhere Relaxation auf. Die Wertschwankungen in dieser Kennlinie sind vermutlich Klimaschwankungen geschuldet, wobei nicht geklärt werden konnte, ob die Probe selbst oder die Messtechnik auf die Schwankungen reagiert. Beide Tests fanden im Hof des FEB statt.

Tabelle 5.5: Physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse HD-Weizenballen flach liegend ohne seitlicher Einspannung, σ_S = 40 kN/m²

Proben-nummer	Abmessungen (m)			u (g/g)	ρ_{tr} (kg/m³)	σ_{R24} (%)	σ_{R120} (%)	σ_{R480} (%)
	l	b	h					
1.3.0.1	0,820	0,360	0,480	0,123	103,04	66,06	59,58	/
1.3.0.2	0,884	0,360	0,480	0,123	92,66	72,00	48,62	34,16
Ø Ballen	0,852	0,360	0,480	0,123	97,66	66,51	54,10	/

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte; σ_{R24}: Restspannung nach 24 Stunden; σ_{R120}: Restspannung nach 120 Stunden; σ_{R480}: Restspannung nach 480 Stunden; Ø Mittelwert aus den betreffenden Werten

5.1.3.2 *Eingespannte HD-Weizenballen, σ_S = 10 und 20 kN/m²*

Es wurden je drei flach liegende, seitlich eingespannte, unverputzte Weizenballen einem Langzeit-Relaxationstest bei einer Startspannung von 10 bzw. 20 kN/m² unterzogen. Alle Tests fanden im Keller des FEB statt. Tabelle 5.6 listet physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse auf.
Das Relaxationsdiagramm (Abbildung 5.7) zeigt die ermittelten Kennlinien über den gesamten Messbereich. Die Kennlinien der 20 kN/m³-Proben liegen höher und näher beisammen. Trotz ihrer höheren Trockendichte unterliegen die 10 kN/m²-Proben offensichtlich einer höheren Relaxation.

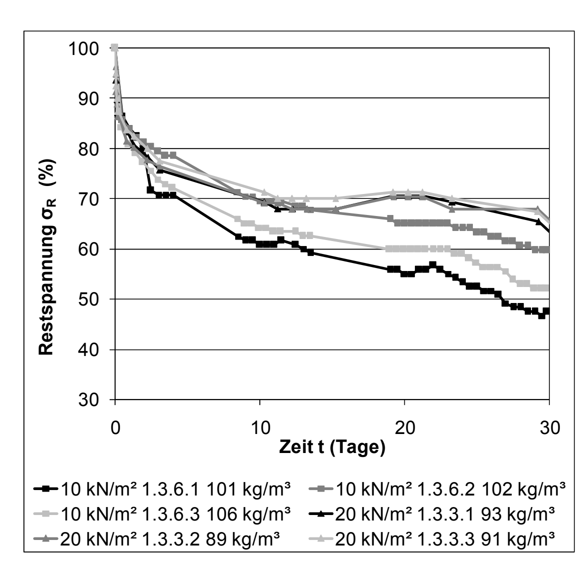


Abbildung 5.7: Relaxationsdiagramm flach liegender unverputzter HD-Weizenballen mit seitlicher Einspannung im Langzeittest σ_S = 10 und 20 kN/m²

Tabelle 5.6: Physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse HD-Weizenballen flach liegend mit seitlicher Einspannung.

Probennummer	Abmessungen (m)			u (g/g)	ρ_{tr} (kg/m³)	σ_{R24} (%)	σ_{R120} (%)	σ_{R480} (%)
	l	b	h					
10 kN/m² 1.3.6.1	0,833	0,360	0,480	0,101	100,62	84,17	/	55,00
10 kN/m² 1.3.6.2	0,790	0,360	0,480	0,128	102,07	83,89	/	65,11
10 kN/m² 1.3.6.3	0,817	0,360	0,480	0,094	105,90	80,83	/	59,92
Ø 10 kN/m²	0,813	0,360	0,480	0,107	102,87	82,964	/	60,00
20 kN/m² 1.3.3.1	0,813	0,360	0,480	0,146	92,56	81,50	/	70,55
20 kN/m² 1.3.3.2	0,845	0,360	0,480	0,125	89,22	80,70	/	70,35
20 kN/m² 1.3.3.3	0,836	0,360	0,480	0,125	89,223	83,000	/	71,23
Ø 20 kN/m²	0,831	0,360	0,480	0,130	90,92	81,73	/	70,71

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte; σ_{R24}: Restspannung nach 24 Stunden; σ_{R120}: Restspannung nach 120 Stunden; σ_{R480}: Restspannung nach 480 Stunden; Ø Mittelwert aus den betreffenden Werten

5.1.3.3 Eingespannte HD-Weizenballen, σ_S = 40 und 60 kN/m²

Es wurden je drei flach liegende, seitlich eingespannte, unverputzte Weizenballen einem Langzeit-Relaxationstest bei einer Startspannung von 40 bzw. 60 kN/m² unterzogen. Alle Tests fanden im Keller des FEB statt. Tabelle 5.7 listet physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse auf.
Aus dem Relaxationsdiagramm (Abbildung 5.11) ist ersichtlich, dass die Kennlinien der 60 kN/m²-Proben, obwohl in der Tendenz weniger dicht, höher liegen, als die der 40 kN/m³ Proben. Probe 1.3.1.1 hat eine deutlich höhere Trockendichte als Proben 1.3.1.2 und 1.3.1.3. Diese Probe zeigt auch die geringste Relaxation der 40 kN/m²-Proben.

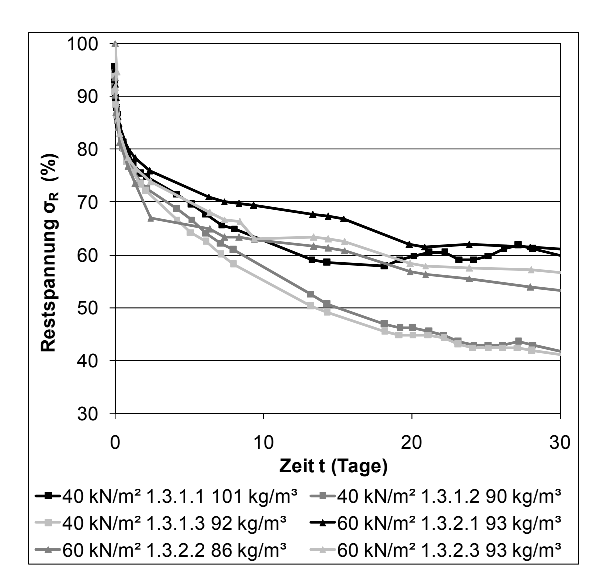


Abbildung 5.8: Relaxationsdiagramm flach liegender unverputzter HD-Weizenballen mit seitlicher Einspannung im Langzeittest σ_S = 40 und 60 kN/m²

Tabelle 5.7: Physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse HD-Weizenballen flach liegend mit seitlicher Einspannung.

Probennummer	Abmessungen (m)			u (g/g)	ρ_{tr} (kg/m³)	σ_{R24} (%)	σ_{R120} (%)	σ_{R480} (%)
	l	b	h					
40 kN/m² 1.3.1.1	0,803	0,360	0,480	0,130	101,03	78,00	69,50	59,77
40 kN/m² 1.3.1.2	0,812	0,360	0,480	0,125	90,064	77,000	66,66	46,14
40 kN/m² 1.3.1.3	0,861	0,360	0,480	0,120	91,83	76,00	64,23	44,83
Ø 40 kN/m²	0,825	0,360	0,480	0,125	94,24	77,00	66,80	50,24
60 kN/m² 1.3.2.1	0,846	0,360	0,480	0,113	93,436	79,000	/	61,91
60 kN/m² 1.3.2.2	0,850	0,360	0,480	0,238	86,801	74,000	/	56,73
60 kN/m² 1.3.2.3	0,832	0,360	0,480	0,121	93,44	74,00	/	58,32
Ø 60 kN/m²	0,843	0,360	0,480	0,155	91,22	77,00	/	58,99

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte; σ_{R24}: Restspannung nach 24 Stunden; σ_{R120}: Restspannung nach 120 Stunden; σ_{R480}: Restspannung nach 480 Stunden; Ø Mittelwert aus den betreffenden Werten

5.2 Untersuchungen zum Relaxationsverhalten von hochkant liegenden Ballen

Es wurden insgesamt 52 Tests an hochkant liegenden Ballen durchgeführt. Untersucht wurden verputzte und unverputzte, eingespannte und nicht eingespannte Ballen aus Weizen-, Roggen-, Gersten-, und Dinkelstroh. Tests mit verputzten und unverputzten Ballen und unterschiedlichen Strohsorten wurden mit Verfahren 1 (28 HD-Ballen und drei Q-Ballen) mit einer Startspannung von 40 kN/m² über 24 bzw. 72 und mehr Stunden untersucht. Dabei wurden auch die Auswirkungen von Garnrissen, Wasserschäden und Stapelung untersucht.
21 HD-Weizenballen wurden mit Verfahren 2 bei Startspannungen von 10, 20, 40 und 60 kN/m³ mit und ohne seitliche Einspannung über einen Zeitraum von bis zu 80 Tagen untersucht.

5.2.1 Untersuchung unverputzter HD-Ballen im Kombitest

Es wurde das Relaxationsverhalten von insgesamt 16 hochkant liegenden, unverputzten Kleinballen mit seitlicher Einspannung getestet. Sechs davon bestanden aus Weizenstroh, je drei aus Gersten- und Dinkelstroh und einer aus Hanffasern. Zum Testablauf siehe Teil II, Abschnitte 3.4.2.2-4.4.2.4.

Weizenballen
Es wurden insgesamt sechs hochkant liegende, seitlich eingespannte, unverputzte Weizenballen einem Relaxationstest unterzogen. Tabelle 5.8 zeigt physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse. Das Relaxationsdiagramm (Abbildung 5.9) zeigt die ermittelten Kennlinien über den gesamten Messbereich. Es ist erkennbar, dass alle Kennlinien, unabhängig von der Trockendichte zunächst relativ eng zusammen liegen. Nach 24 Stunden wurden die Garnbänder von Probe 1.5.2.3 durchtrennt. Daraus resultiert ein spontanes, deutliches Absacken der Spannung. Zum gleichen Zeitpunkt wurde Probe 1.5.2.2 unter Wasser gesetzt. Die Spannung bricht spontan deutlich ein und stabilisiert sich in der Folge auf niedrigem Niveau. Es scheint, als unterlägen Ballen mit höherer Trockendichte einer geringeren Relaxation.

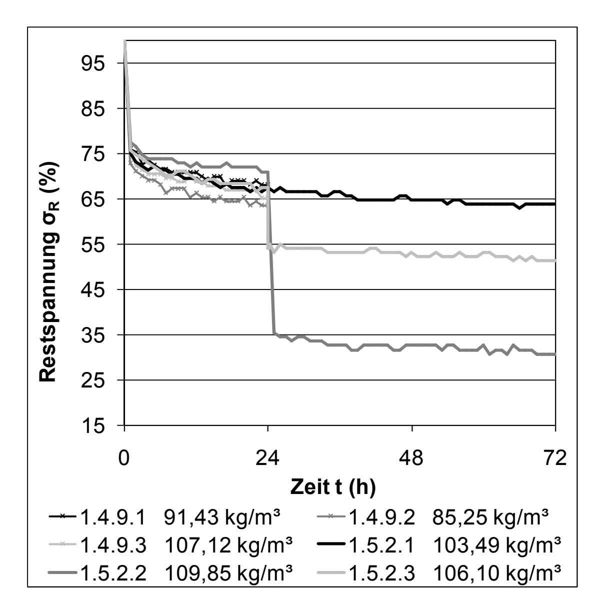


Abbildung 5.9: Relaxationsdiagramm hochkant liegender unverputzter HD-Weizenballen mit seitlicher Einspannung im Kombitest ausgehend von einer Startspannung von 40 kN/m²

Tabelle 5.8: Physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse HD-Weizenballen hochkant flach liegend mit seitlicher Einspannung

Probennummer	Abmessungen (m) l	b	h	u (g/g)	ρ_{tr} (kg/m³)	σ_{R24} (%)
1.4.9.1*	0,866	0,374	0,502	0,123	91,43	68,08
1.4.9.2*	0,835	0,369	0,489	0,120	85,26	63,48
1.4.9.3*	0,857	0,374	0,481	0,112	107,12	65,12
1.5.2.1	0,856	0,360	0,480	0,121	103,49	67,53
1.5.2.2	0,834	0,367	0,480	0,108	109,85	70,96
1.5.2.3	0,882	0,367	0,481	0,102	106,10	67,51
Ø Ballen	0,855	0,369	0,486	0,114	100,54	67,11

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte; σ_{R24}: Restspannung nach 24 Stunden; Ø Mittelwert aus den betreffenden Werten; * Messungen im Rahmen der Diplomarbeit von Struwe (2007) durchgeführt

Roggen-, Gersten- und Dinkelballen
Es wurden je drei hochkant liegende, seitlich eingespannte, unverputzte HD-Roggen und Dinkelstrohballen sowie zwei Gerstenstrohballen einem Relaxationstest unterzogen. Diese Tests wurden von Struwe (2007) im Rahmen seiner Diplomarbeit durchgeführt. Die Daten wurden in der vorliegenden Dissertation neu interpretiert. Tabelle 5.9 listet physikalische Balleneigenschaften sowie Testergebnisse auf.

Das Relaxationsdiagramm (Abbildung 5.10) zeigt die ermittelten Kennlinien über den gesamten Messbereich. Ein Zusammenhang zwischen Trockendichte und Höhe des Spannungsabbaus ist nicht evident. Die Roggenproben weisen die geringste, die Gerstenproben die höchste Relaxation auf.

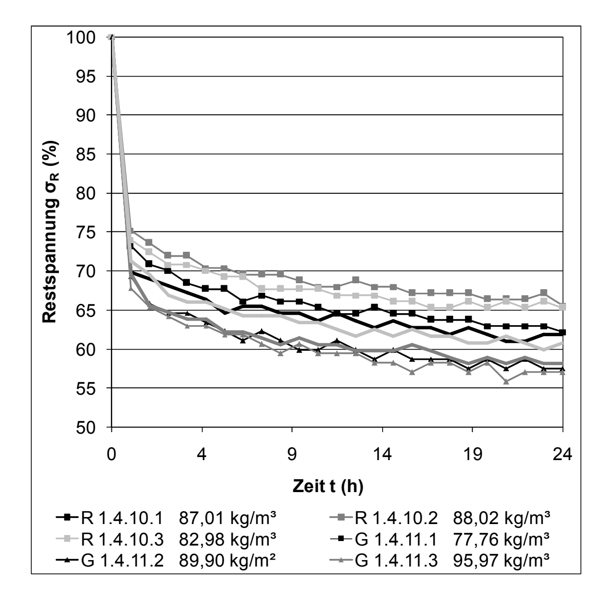


Abbildung 5.10: Relaxationsdiagramm hochkant liegender unverputzter HD-Roggen, - Gersten- und Dinkelballen mit seitlicher Einspannung im Kombitest ausgehend von einer Startspannung von 40 kN/m²

Tabelle 5.9: Physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse HD-Roggen-, Gersten- und Dinkelballen hochkant liegend mit seitlicher Einspannung

Proben-nummer	Abmessungen (m) l	b	h	u (g/g)	ρ_{tr} (kg/m³)	σ_{R24} (%)
R 1.4.10.1	0,993	0,367	0,504	0,127	87,00	62,15
R 1.4.10.2	0,973	0,367	0,504	0,110	88,02	65,54
R 1.4.10.3	1,016	0,364	0,508	0,128	82,98	65,29
Ø Roggen	0,994	0,366	0,505	0,122	86,00	64,33
G 1.4.11.2	0,670	0,361	0,491	0,098	89,90	57,53
G 1.4.11.3	0,661	0,364	0,481	0,108	95,97	57,03
Ø Gerste	0,444	0,242	0,324	0,068	61,96	57,28
D 1.4.12.1	0,870	0,370	0,479	0,144	86,28	61,87
D 1.4.12.2	0,944	0,369	0,496	0,126	79,42	58,12
D 1.4.12.3	0,883	0,373	0,475	0,134	80,83	60,79
Ø Dinkel	0,899	0,371	0,483	0,134	82,18	60,26

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte; σ_{R24}: Restspannung nach 24 Stunden; R: Proben aus Roggenstroh; G: Proben aus Gerstenstroh; D: Proben aus Dinkelstroh; Ø Mittelwert aus den betreffenden Werten

5.2.2 Untersuchung von unverputzten Q-Weizenballen im Kombitest

Es wurde das Relaxationsverhalten von drei hochkant liegenden, unverputzten Q-Weizenballen mit seitlicher Einspannung getestet. Die Tests waren auf einen Monat angesetzt. Aufgrund eines Fehlers im Datenlogger wurden jedoch erhebliche Teile der Daten nicht bzw. nicht korrekt aufgezeichnet. Zum Testablauf siehe Teil II Abschnitt 3.4.3, *Tests mit dem Q-Ballen Kombiprüfstand*. Tabelle 5.10 listet physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse auf.

Trotz der sehr ähnlichen Dichte weisen die Kurven bzw. Kurvenfragmente deutliche Unterschiede auf. Die ausgeprägten Schwankungen der Werte bei 1.6.1.1 werden auf tageszeitliche Temperaturänderungen zurückgeführt, wobei unklar bleibt, ob diese Schwankungen das Verhalten des Ballens selbst oder die Messtechnik beeinflusst hat. Eine Abhängigkeit der Relaxation von der Ballentrockendichte ist nicht evident.

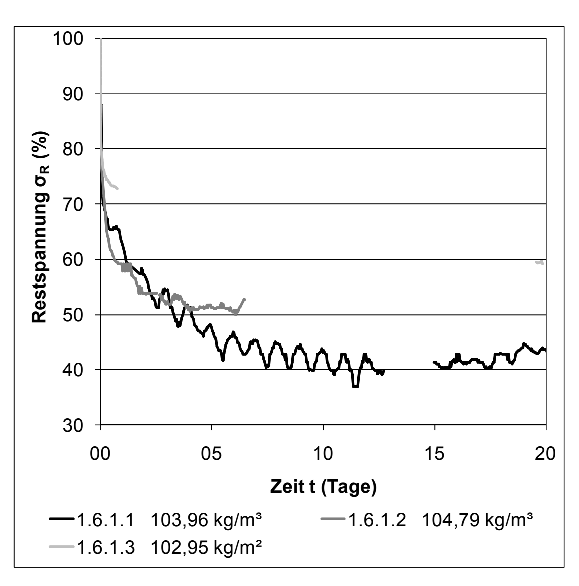


Abbildung 5.11: Relaxationsdiagramm hochkant liegender unverputzter Q-Weizenballen mit seitlicher Einspannung ausgehend von einer Startspannung von 40 kN/m³

Tabelle 5.10: Physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse HD-Weizenballen hochkant flach liegend mit seitlicher Einspannung

Proben-nummer	Abmessungen (m) l	b	h	u (g/g)	ρ_{tr} (kg/m³)	σ_{R24} (%)
1.6.1.1	2,272	0,850	1,247	0,110	103,96	62,52
1.6.1.2	2,244	0,850	1,255	0,124	104,79	57,80
1.6.1.3	2,294	0,850	1,269	0,115	102,95	65,50
Ø Ballen	2,270	0,850	1,257	0,116	103,91	61,94

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte; σ_{R24}: Restspannung nach 24 Stunden; Ø Mittelwert aus den betreffenden Werten

5.2.3 Untersuchung von unverputzten halbierten und zusammengesetzten HD-Weizenballen im Kombitest

Diese Testreihe soll Aufschluss darüber bringen, ob hochkant liegend übereinander gestapelte Ballen „ineinander rutschen". Dazu wurden 5 Strohballen halbiert. 2 Proben wurden halbiert belastet, 2 Tests wurden mit jeweils zwei aufeinander gestapelten halben Ballen durchgeführt. Bei den letzten beiden Tests wurde ein Stahlblech zwischen die Ballenhälften eingelegt, um ein „ineinander rutschen" sicher zu verhindern. Zum genauen Testablauf siehe Teil II Abschnitt 3.4.2.8, *Spannungs-Stauchungstests mit halbierten und zusammengesetzten halbierten, unverputzten Ballen mit seitlicher Einspannung*. Abbildung 5.12 visualisiert die Messergebnisse, Tabelle 5.11 listet physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse auf.

Alle Kennlinien liegen relativ dicht beisammen. In der Tendenz scheinen die halbierten Ballen einer geringeren Relaxation unterworfen zu sein als die zusammengesetzten mit Zwischenlage.

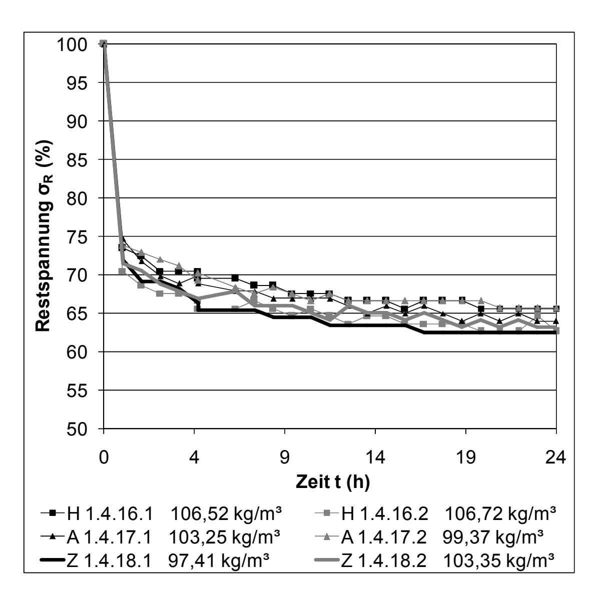


Abbildung 5.12: Relaxationsdiagramm hochkant liegender halbierter und zusammengesetzter unverputzter HD-Weizenballen mit seitlicher Einspannung ausgehend von einer Startspannung von 40 kN/m²

Tabelle 5.11: Physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse HD-Weizenballen hochkant flach liegend mit seitlicher Einspannung halbiert und zusammengesetzt

Probennummer	Abmessungen (m) l	b	h	u (g/g)	ρ_{tr} (kg/m³)	σ_{R24} (%)
H 1.4.16.1	0,805	0,183	0,480	0,110	106,52	65,61
H 1.4.16.2	0,805	0,183	0,480	0,110	106,52	62,66
Ø Halb	0,805	0,183	0,480	0,110	106,52	64,14
A 1.4.17.1	0,823	0,362	0,478	0,110	103,25	64,00
A 1.4.17.2	0,878	0,366	0,475	0,112	99,37	65,70
Ø Aufeinander	0,851	0,364	0,477	0,111	101,25	64,85
Z 1.4.18.1	0,834	0,370	0,483	0,114	97,41	62,54
Z 1.4.18.2	0,851	0,370	0,482	0,106	103,54	63,23
Ø Zwischenl.	0,843	0,370	0,483	0,110	100,50	62,88

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte; σ_{R24}: Restspannung nach 24 Stunden; H: Halbe Ballen; A: Aufeinandergesetzte Ballen; Z: mit Zwischenlage; Ø Mittelwert aus den betreffenden Werten

5.2.4 Untersuchung verputzter HD-Weizenballen im Kombitest

Es wurde das Relaxationsverhalten von insgesamt sechs hochkant liegenden, verputzten HD-Weizenballen mit seitlicher Einspannung getestet. Dabei wurde die Last bei drei Ballen indirekt und bei 3 Ballen direkt in den Putz eingeleitet. Je Lasteinleitungsart wurden bei einem Test ein Wasserschaden und ein Garnausfall simuliert. Zum Testablauf siehe Teil II Abschnitte 3.4.2.2-3.4.2.4. Tabelle 5.12 listet physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse auf.

Das Relaxationsdiagramm (Abbildung 5.13) zeigt die ermittelten Kennlinien über den gesamten Messbereich. Die Ballen, bei denen der Putz direkt belastet wurde, zeigen eine geringere Relaxation. Die Kennlinien der Proben, bei welchen der Putz indirekt belastet wurde, liegen enger zusammen.

Bei Ballen 1.5.4.3 und 1.5.5.3 wurden die Garnbänder nach 24 Stunden durchtrennt. Ein Effekt ist aus dem Diagramm nicht erkennbar.

Ballen 1.5.4.2 und 1.5.5.2 wurden nach 24 Stunden unter Wasser gesetzt.

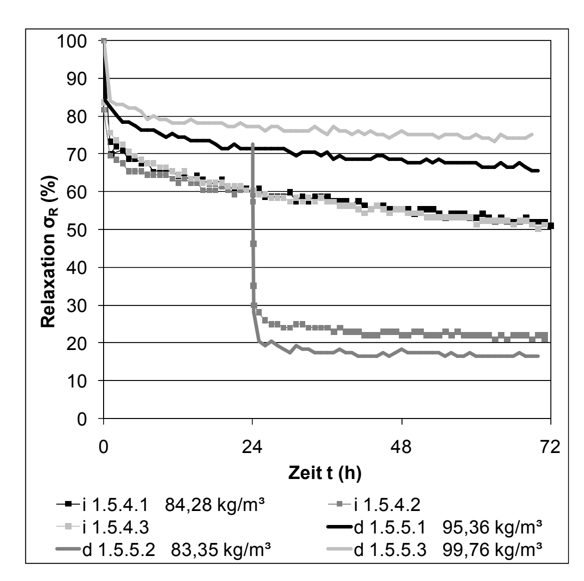


Abbildung 5.13: Relaxationsdiagramm verputzter hochkant liegender HD-Weizenballen mit seitlicher Einspannung ausgehend von einer Startspannung von 40 kN/m²

Die Spannung bricht bei beiden Proben spontan und deutlich ein, stabilisiert sich jedoch bei dem indirekt belasteten Ballen früher als bei dem direkt belasteten . Das Zuführen des Wassers hat bei beiden Proben eine sofortige Zerstörung der Putzschicht im wasserberührenden Bereich zur Folge. Bei den Proben 1.5.4.2 und 3 gingen die Werte für die relative Luftfeuchte und die Temperatur im Ballen verloren. Daher konnte für diese Proben keine absolute Feuchte und keine Trockendichte ermittelt werden. Ein Zusammenhang zwischen Trockendichte und Relaxation ist nicht evident.



Abbildung 5.14: Zerstörung des Putzes durch Wasser bei Probe 1.5.4.2

Tabelle 5.12: Physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse verputzter HD-Weizenballen hochkant liegend mit seitlicher Einspannung

Proben-nummer	**Abmessungen (m)**			**u (g/g)**	**ρ_{tr} (kg/m³)**	**σ_{R24} (%)**
	l	**b**	**h**			
i 1.5.4.1	0,809	0,360	0,460	0,141	84,28	59,90
i 1.5.4.2	0,874	0,360	0,479	0,141	/	59,50
i 1.5.4.3	0,911	0,360	0,480	0,105	/	60,52
Ø indirekt	0,865	0,473	0,360	0,128	/	59,97
d 1.5.5.1	0,807	0,360	0,480	0,105	95,36	71,51
d 1.5.5.2	0,809	0,360	0,480	0,105	83,35	72,49
d 1.5.5.3	0,816	0,360	0,480	0,105	99,76	77,18
Ø direkt	0,811	0,360	0,480	0,105	92,84	74,34

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte; σ_{R24}: Restspannung nach 24 Stunden; i: indirekte Lasteinleitung; d: direkte Lasteinleitung in den Putz; Ø Mittelwert aus den betreffenden Werten

5.2.5 Untersuchung unverputzter hochkant liegender HD-Weizenballen im Langzeittest

Im Langzeittest wurde das Relaxationsverhalten von 21 hochkant liegenden HD- Weizenballen untersucht. Je drei Tests wurden ohne Einspannung bei einer Startspannung von 20 und 40 kN/m² durchgeführt, je drei Tests an eingespannten Ballen mit Startspannungen von 10, 20, und 60 kN/m², sechs Tests mit einer Startspannung von 40 kN/m³. Zum Testablauf siehe Teil **II**, Abschnitt 3.4.4, *Tests mit den Relaxationsprüfständen*. Alle Tests fanden im Keller des FEB statt.

5.2.5.1 Nicht eingespannte HD-Weizenballen, σ_S = 20 und 40 kN/m²

Es wurden insgesamt je drei hochkant liegende, seitlich nicht eingespannte, unverputzte Weizenballen einem Langzeit-Relaxationstest mit Startspannungen von 20 bzw. 40 kN/m² unterzogen. Tabelle 5.13 listet physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse auf.

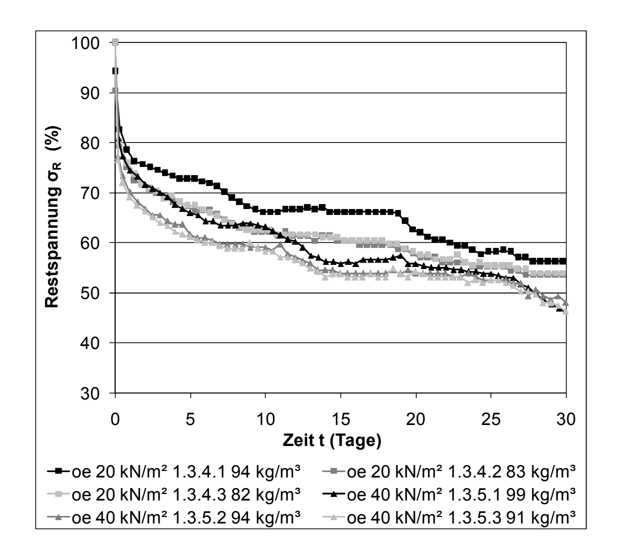


Abbildung 5.15: Relaxationsdiagramm hochkant liegender unverputzter HD-Weizenballen ohne seitliche Einspannung σ_S = 20 und 40 kN/m²

Aus dem Relaxationsdiagramm (Abbildung 5.15) ist ersichtlich, dass die 40 kN/m²-Proben trotz deutlich höherer Dichte eine geringere Relaxation aufweisen. Das Kennlinienfeld dieser Proben ist kompakter als jenes der 20 kN/m²-Proben.

Tabelle 5.13: Physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse HD-Weizenballen hochkant liegend ohne seitliche Einspannung.

Probennummer	**Abmessungen (m)**			**u (g/g)**	**ρ_{tr} (kg/m³)**	**σ_{R24} (%)**	**σ_{R120} (%)**	**σ_{R480} (%)**
	l	**b**	**h**					
20 kN/m² 1.3.4.1	0,828	0,480	0,360	0,132	94,31	77,00	72,76	62,78
20 kN/m² 1.3.4.2	0,815	0,480	0,360	0,146	94,31	74,00	67,33	57,87
20 kN/m² 1.3.4.3	0,838	0,480	0,360	0,137	82,37	74,50	67,44	58,23
Ø 20 kN/m²	0,827	0,480	0,360	0,138	86,56	75,17	69,17	59,63
40 kN/m² 1.3.5.1	0,823	0,480	0,360	0,118	98,71	74,47	65,96	55,83
40 kN/m² 1.3.5.2	0,823	0,480	0,360	0,124	93,55	70,13	61,69	53,90
40 kN/m² 1.3.5.3	0,840	0,480	0,360	0,121	90,71	69,14	61,14	54,28
Ø 40 kN/m³	0,829	0,480	0,360	0,121	94,30	71,249	62,93	54,67

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte; σ_{R24}: Restspannung nach 24 Stunden; σ_{R120}: Restspannung nach 120 Stunden; σ_{R480}: Restspannung nach 480 Stunden; Ø Mittelwert aus den betreffenden Werten

5.2.5.2 Eingespannte HD-Weizenballen, σ_S = 10 und 20 kN/m²

Es wurden je drei hochkant liegende, seitlich eingespannte, unverputzte Weizenballen einem Langzeit-Relaxationstest bei einer Startspannung von 10 bzw. 20 kN/m² unterzogen. Tabelle 5.14 listet physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse auf.
Das Relaxationsdiagramm (Abbildung 5.16) zeigt: Sowohl bei den 10 kN/m² als auch bei den 20 kN/m²-Proben ist ein ausgeprägter Zusammenhang zwischen Trockendichte und Relaxation erkennbar. Bei etwa gleichen mittleren Trockendichten weisen die 10 kN/m³-Proben eine höhere Relaxation auf.

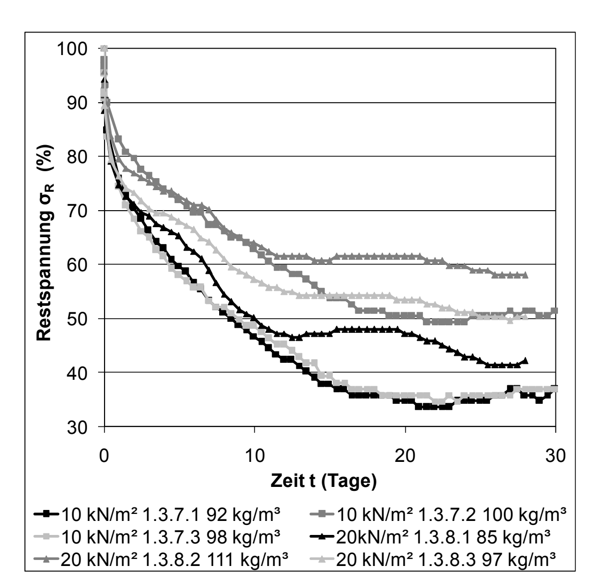


Abbildung 5.16: Relaxationsdiagramm hochkant liegender unverputzter HD-Weizenballen mit seitlicher Einspannung σ_S = 10 und 20 kN/m²

Tabelle 5.14: Physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse HD-Weizenballen hochkant liegend mit seitlicher Einspannung.

Probennummer	Abmessungen (m) l	b	h	u (g/g)	ρ_{tr} (kg/m³)	σ_{R24} (%)	σ_{R120} (%)	σ_{R480} (%)
10 kN/m² 1.3.7.1	0,854	0,480	0,390	0,146	91,90	76,09	59,78	34,78
10 kN/m² 1.3.7.2	0,836	0,480	0,360	0,147	100,20	83,10	71,84	50,43
10 kN/m² 1.3.7.3	0,815	0,480	0,360	0,147	100,20	74,350	58,03	35,88
Ø 10 kN/m²	0,835	0,480	0,370	0,143	96,64	77,85	63,22	40,36
20 kN/m² 1.3.8.1	0,817	0,480	0,360	0,127	84,81	74,72	65,33	47,27
20 kN/m² 1.3.8.2	0,869	0,480	0,360	0,183	111,24	79,474	72,63	61,51
20 kN/m² 1.3.8.3	0,853	0,480	0,360	0,116	96,80	76,35	67,96	53,46
Ø 20 kN/m²	0,846	0,480	0,360	0,145	97,91	76,85	68,64	54,08

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte; σ_{R24}: Restspannung nach 24 Stunden; σ_{R120}: Restspannung nach 120 Stunden; σ_{R480}: Restspannung nach 480 Stunden; Ø Mittelwert aus den betreffenden Werten

5.2.5.3 *Eingespannte HD-Weizenballen, σ_S = 40 und 60 kN/m²*

Durch einen Stromausfall kam es bei den 40 kN/m²-Proben zu einem Datenverlust ca. 120 Stunden nach Testbeginn. Daher wurde dieser Test mit einer Laufzeit von 84 Tagen wiederholt. Also liegen zu den 40 kN/m²-Proben bis 120 Stunden jeweils sechs Werte vor. Bei einer Startspannung von 60 kN/m² wurden 3 Tests durchgeführt. Tabelle 5.15 listet physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse auf.

Aus dem Relaxationsdiagramm (Abbildung 5.17) ist ersichtlich: Die Kennlinien der 60 kN/m²-Proben, obwohl in der Tendenz etwas dichter, unterliegen einer höheren Relaxation als die der 40 kN/m³ Proben. Nach etwa 55 Tagen scheint die Relaxation der 40 k/m²-Proben, abgesehen von den Klima bedingten Schwankungen, im Wesentlichen abgeschlossen zu sein. Nach 2000 Stunden (83 Tage) sind noch durchschnittlich 53 % der ursprünglich aufgebrachten Spannung vorhanden.

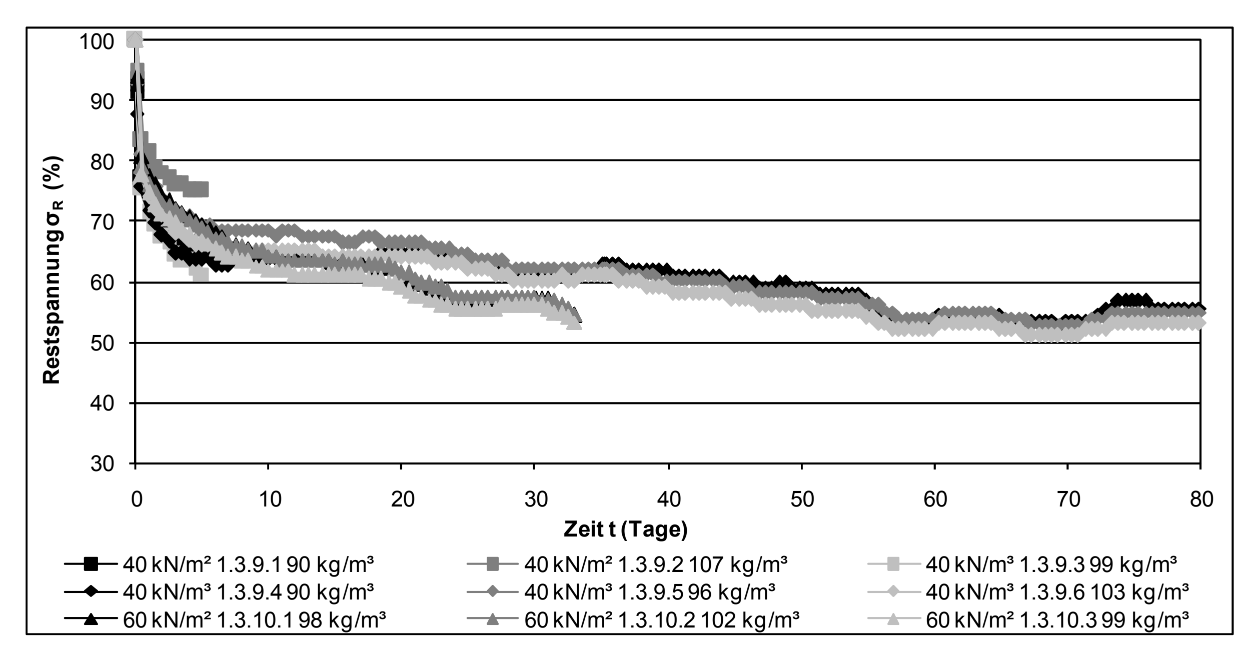


Abbildung 5.17: Relaxationsdiagramm hochkant liegender unverputzter HD-Weizenballen mit seitlicher Einspannung σ_S = 40 und 60 kN/m²

Tabelle 5.15: Physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse HD-Weizenballen hochkant liegend mit seitlicher Einspannung.

Probennummer	Abmessungen (m)			u (g/g)	ρ_{tr} (kg/m³)	σ_{R24} (%)	σ_{R120} (%)	σ_{R480} (%)	σ_{R2000} (%)
	l	b	h						
40 kN/m² 1.3.9.1	0,888	0,480	0,360	0,123	90,18	74,35	64,86	/	/
40 kN/m² 1.3.9.2	0,865	0,480	0,360	0,124	107,29	81,36	75,16	/	/
40 kN/m³ 1.3.9.3	0,845	0,480	0,360	0,127	99,43	71,51	61,34	/	/
40 kN/m³ 1.3.9.4	0,837	0,476	0,363	0,091	90,42	71,80	63,75	64,75	54,68
40 kN/m³ 1.3.9.5	0,843	0,496	0,367	0,094	96,01	78,03	69,67	66,53	53,97
40 kN/m³ 1.3.9.6	0,851	0,467	0,367	0,103	103,20	74,07	66,10	64,10	52,13
40 kN/m³	0,855	0,480	0,363	0,110	97,75	75,19	66,81	61,67	53,60
60 kN/m² 1.3.10.1	0,834	0,485	0,369	0,112	98,45	77,53	69,60	61,37	/
60 kN/m² 1.3.10.2	0,835	0,484	0,365	0,112	101,53	76,23	68,80	59,08	/
60 kN/m² 1.3.10.3	0,831	0,484	0,377	0,115	98,50	74,87	66,97	59,08	/
60 kN/m³	0,833	0,484	0,370	0,113	99,48	76,21	68,46	60,70	/

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte; σ_{X24}: Relaxation nach 24 Stunden; σ_{X120}: Restspannung nach 120 Stunden; σ_{X480}: Restspannung nach 480 Stunden; σ_{X2000}: Restspannung nach 2000 Stunden; Ø Mittelwert aus den betreffenden Werten

5.3 Untersuchungen zum Relaxationsverhalten von stehenden Ballen im Kombitest

Es wurde das Relaxationsverhalten von drei stehenden HD-Weizenballen ohne Einspannung bei einer Startspannung von 20 kN/m² untersucht. Tabelle 5.16 listet physikalische Eigenschaften und Testergebnisse auf.
Das Relaxationsdiagramm (Abbildung 5.18) zeigt die ermittelten Kennlinien über den gesamten Messbereich. Es ist erkennbar, dass alle Kennlinien unabhängig von der Trockendichte zunächst relativ eng zusammen liegen. Nach 24 Stunden wurde Probe 1.5.3.2 unter Wasser gesetzt. Die Spannung bricht spontan deutlich ein und stabilisiert sich in der Folge auf niedrigem Niveau. Es scheint, als unterlägen Ballen mit höherer Trockendichte einer geringeren Relaxation. Die starke Welligkeit der Kennlinien resultiert aus der kleinen Ballenfläche, damit der geringen Kraft und geringer Auflösung der Messwerterfassung.

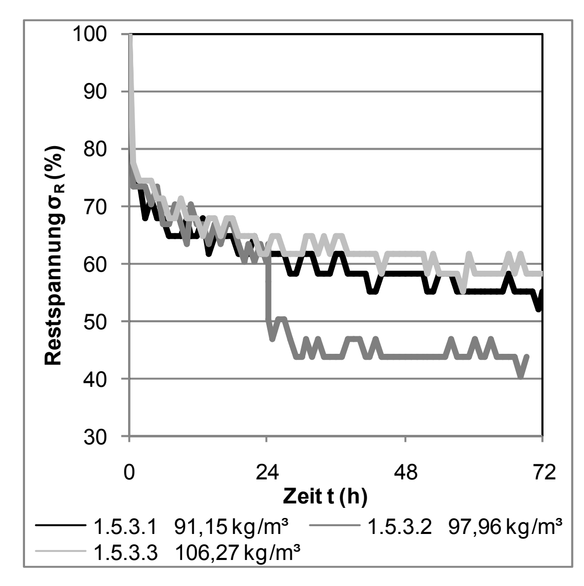


Abbildung 5.18: Relaxationsdiagramm stehender unverputzter HD-Weizenballen ohne seitliche Einspannung ausgehend von einer Startspannung von 20 kN/m²

Tabelle 5.16: Physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse HD-Weizenballen stehend ohne seitliche Einspannung

Probennummer	Abmessungen (m)			u (g/g)	ρ_{tr} (kg/m³)	σ_{R24} (%)
	l	b	h			
1.5.3.1	0,710	0,489	0,367	0,121	91,15	55,11
1.5.3.2	0,691	0,482	0,361	0,107	97,96	43,69
1.5.3.3	0,671	0,480	0,371	0,110	106,27	58,32
Ø Ballen	0,691	0,484	0,366	0,113	98,31	/

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte; σ_{X24}: Restspannung nach 24 Stunden; Ø Mittelwert aus den betreffenden Werten

5.4 *Untersuchungen zum Relaxationsverhalten partiell belasteter HD-Weizenballen im Kombitest*

Es wurde das Relaxationsverhalten von je einem partiell belasteten flach und hochkant liegenden HD-Weizenballen mit Einspannung bei einer Startspannung von 40 kN/m² untersucht. Tabelle 5.17 listet physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse auf.
Das Relaxationsdiagramm (Abbildung 5.19) zeigt die ermittelten Kennlinien über den gesamten Messbereich. Die Kennlinien beider Proben unterscheiden sich trotz der unterschiedlichen Orientierung nicht wesentlich. Die Relaxation der flach liegenden Probe fällt geringer aus, jedoch hat diese auch die höhere Trockendichte.

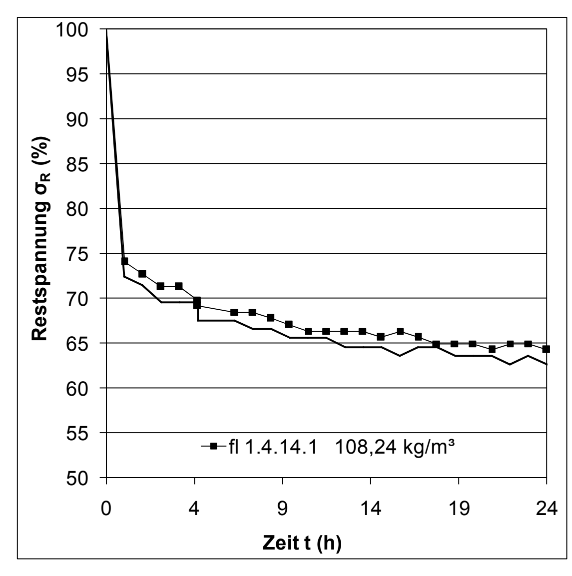


Abbildung 5.19: Relaxationsdiagramm der partiell belasteten unverputzten HD-Weizenballen mit seitlicher Einspannung ausgehend von einer Startspannung von 40 kN/m²

Tabelle 5.17: Physikalische Balleneigenschaften und Testergebnisse partiell belasteter HD-Weizenballen

Proben-nummer	Abmessungen (m) l	b	h	u (g/g)	ρ_{tr} (kg/m³)	σ_{R24} (%)
fl 1.4.14.1	0,863	0,476	0,364	0,100	108,24	64,26
hl 1.4.15.1	0,806	0,363	0,473	0,095	104,63	62,64

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte; σ_{R24}: Restspannung nach 24 Stunden;

6 Untersuchung des Kriechverhaltens von Einzelballen

Die Tests zum Kriechverhalten von Einzelballen wurden wie in Teil II Abschnitt 3.4.5, *Tests mit dem Kriechprüfstand*, beschrieben, an flach und hochkant liegenden unverputzten HD-Ballen mit seitlicher Einspannung durchgeführt. Getestet wurden insgesamt je ein Miscanthus- und Switchgrasballen und 13 Weizenballen. Die Tests dauerten in der Regel einen Monat.

6.1 *Untersuchung des Kriechverhaltens an flach liegenden Ballen*

Es wurde je ein Miscanthus- und ein Switchgrasballen sowie 7 Weizenballen mit seitlicher Einspannung getestet. Tabelle 6.1 listet physikalische Balleneigenschaften sowie Testergebnisse auf:

Abbildung 6.1 zeigt die Stauchung der einzelnen Proben über maximal 30 Tage.

Zu erkennen ist, dass die mit einer Spannung von 20 kN/m² belasteten Proben (schwarze Kurven) im unteren Bereich des Diagramms angesiedelt sind, die mit 60 kN/m² beaufschlagten Proben (graue Kurven) im oberen Diagrammbereich.
Während die Miscanthusprobe im Vergleich zu den Weizenballen eine geringe Stauchung

aufweist, wird die Switchgrasprobe trotz hoher Dichte stark gestaucht.
Bei den mit 60 kN/m² belasteten Weizenproben ist zu erkennen, dass dichtere Ballen weniger gestaucht werden als weniger dichte Ballen. Bei den mit 20 kN/m² gespannten Ballen ist dies nicht zu erkennen.
Probe 1.2.2.2 wurde vor dem Test wie in Teil II Anschnitt 3.4.5, *Tests mit dem Kriechprüfstand*, beschrieben mit Gewindestangen vorkomprimiert. Versehentlich lag die Vorkomprimierung über 40 kN/m². Im Diagramm ist erkennbar, dass sich diese Probe zunächst wieder ausdehnte und erst dann zu kriechen begann.
Abbildung 6.2 zeigt die Gesamtstauchung aller getesteten flach liegenden HD-Ballen. Die Gesamtstauchung setzt sich aus der Anfangsverformung, welche durch das Aufbringen der Last entsteht, und der Kriechverformung zusammen.
Deutlich sichtbar sind die Lageunterschiede der Kurven der mit 20 und 60 kN/m² belasteten Proben. Anders als bei der Kriechverformung ist bei der Gesamtstauchung eine Abhängigkeit zwischen Stauchung und Trockendichte in beiden Belastungsgruppen erkennbar.

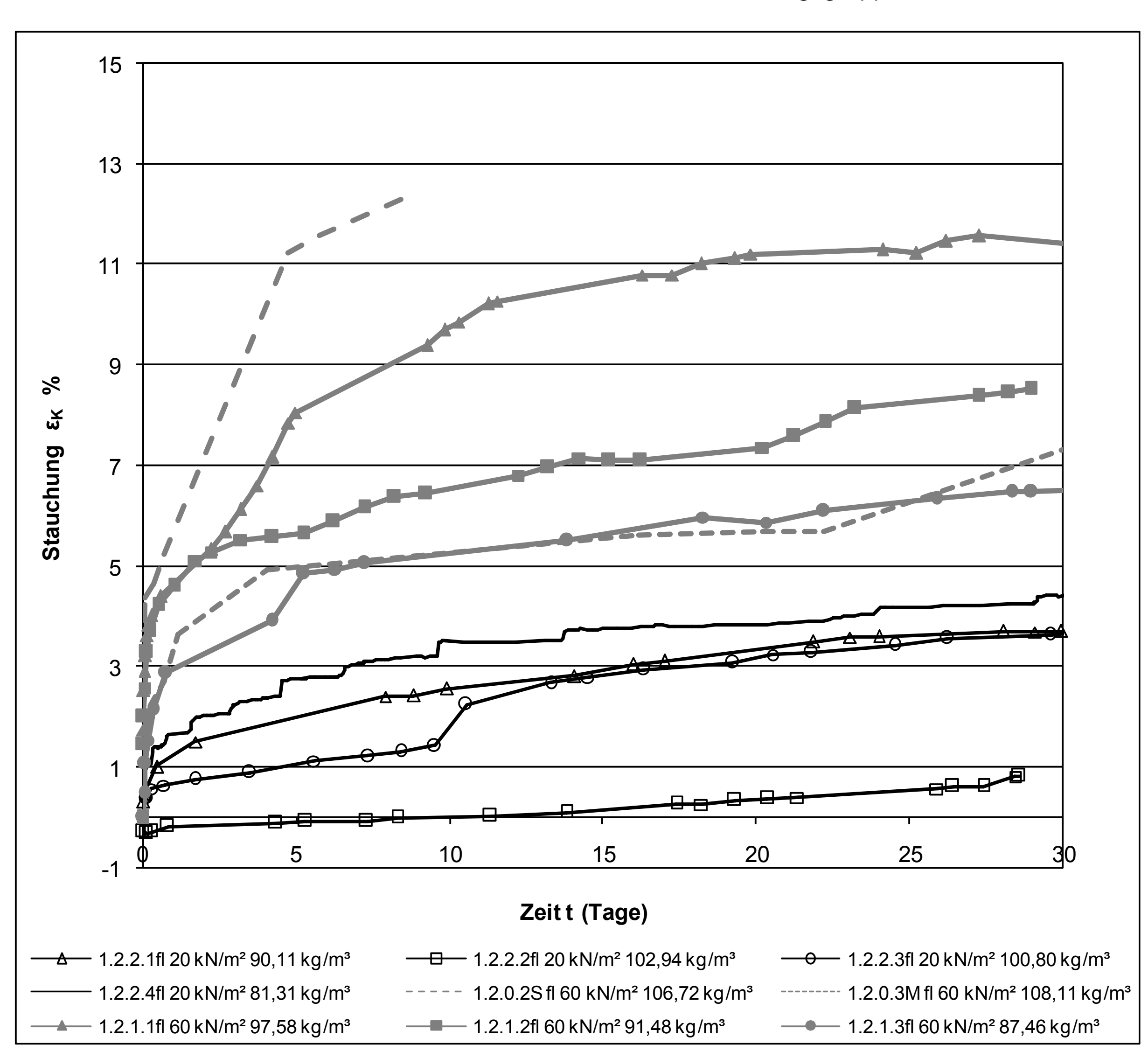


Abbildung 6.1: Kriechverhalten flach liegender HD-Weizen-, Miscanthus (M)- und Switchgras (S)- Ballen

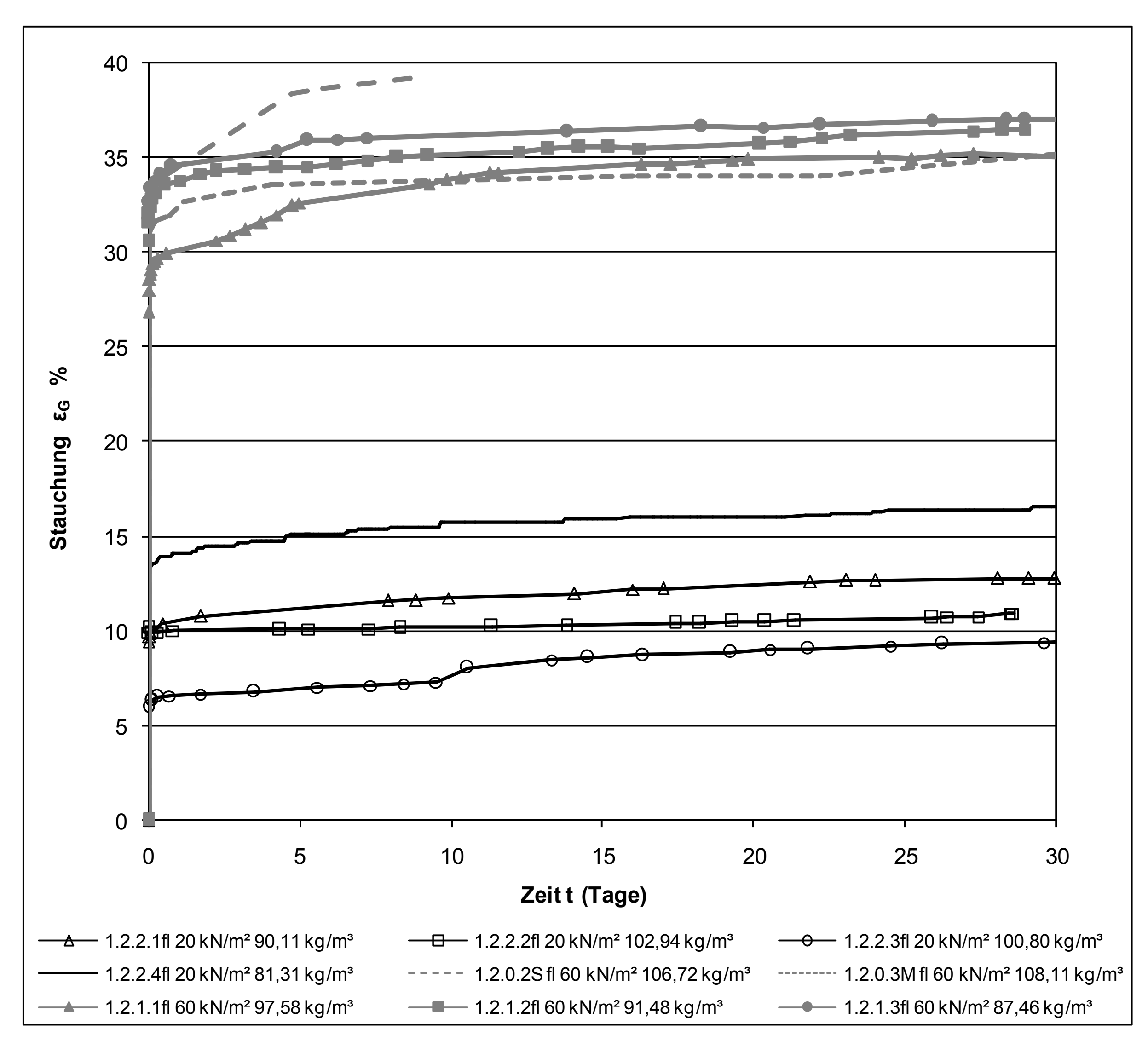


Abbildung 6.2: Gesamtstauchung flach liegender HD-Weizen-, Miscanthus (M)- und Switchgras (S)- Ballen

Tabelle 6.1: Physikalische Balleneigenschaften und Stauchungen flach liegender HD-Ballen

Proben-nummer	Abmessungen (m)			u (g/g)	ρ_{tr} (kg/m³)	σ (kN/m²)	ε_{K20} (%)	ε_{G20} (%)
	l	b	h					
1.2.0.2S	0,77	0,36	0,48	0,15	106,72	60	/	/
1.2.0.3M	0,81	0,36	0,48	0,09	108,11	60	5,70	34,03
1.2.1.1	0,80	0,36	0,48	0,12	97,58	60	11,20	34,88
1.2.1.2	0,80	0,36	0,48	0,12	91,48	60	7,36	35,66
1.2.1.3	0,81	0,36	0,48	0,13	87,46	60	5,87	36,55
Ø 60 kN/m³	0,80	0,36	0,48	0,12	92,17	60	7,65	35,99
1.2.2.1	0,85	0,36	0,48	0,14	90,11	20	3,49	12,57
1.2.2.2	0,77	0,36	0,48	0,14	102,94	20	0,37	10,50
1.2.2.3	0,82	0,36	0,48	0,15	100,80	20	2,94	8,71
1.2.2.4	0,80	0,36	0,48	0,11	81,31	20	3,84	16,01
Ø 20 kN/m³	0,81	0,36	0,48	0,13	93,79	20	3,42*	11,95

S: Switchgras; M: Miscanthus; u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte; σ: Testspannung; ε_{K20}: Kriechstauchung nach 20 Tagen; ε_{G20}: Gesamtstauchung nach 20 Tagen; Ø Mittelwert aus den betreffenden Werten; *: ohne 1.2.2.2

6.2 Untersuchung des Kriechverhaltens an hochkant liegenden Ballen

Es wurden 6 hochkant liegende Weizenballen mit seitlicher Einspannung getestet. Tabelle 6.2 listet physikalische Balleneigenschaften sowie Testergebnisse auf.
Abbildung 6.3 zeigt die Stauchung der einzelnen Proben über maximal 30 Tage.
Auffällig ist, dass die Proben gleicher Belastung nicht beieinander liegen sondern sich durchmischen. Die Proben der Gruppe 20 kN/m² weisen in der Tendenz eine höhere Kriechverformung auf als die Proben der Gruppe 60 kN/m². Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Proben der Gruppe 60 kN/m² erheblich dichter sind als jene der Gruppe 20 kN/m². Allerdings ist innerhalb der Gruppen kein Zusammenhang zwischen Trockendichte und Kriechverformung erkennbar.

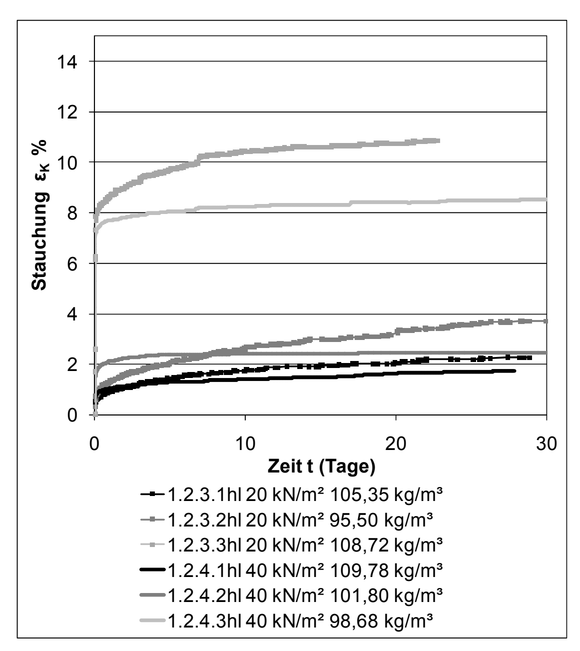


Abbildung 6.3: Kriechverhalten hochkant liegender HD-Weizenballen

Abbildung 6.4 zeigt die Gesamtstauchung aller getesteten hochkant liegenden HD-Ballen. Die Gesamtstauchung setzt sich aus der Anfangsverformung, welche durch das Aufbringen der Last entsteht, und der Kriechverformung zusammen.
Bei der Gesamtstauchung gilt analog was zum Kriechverhalten hochkant liegender Ballen gesagt wurde: Es findet eine Durchmischung der Belastungsgruppen hinsichtlich der Stauchung statt. Eine Korrelation zwischen der Gesamtstauchung und der Ballentrockendichte nicht erkennbar.

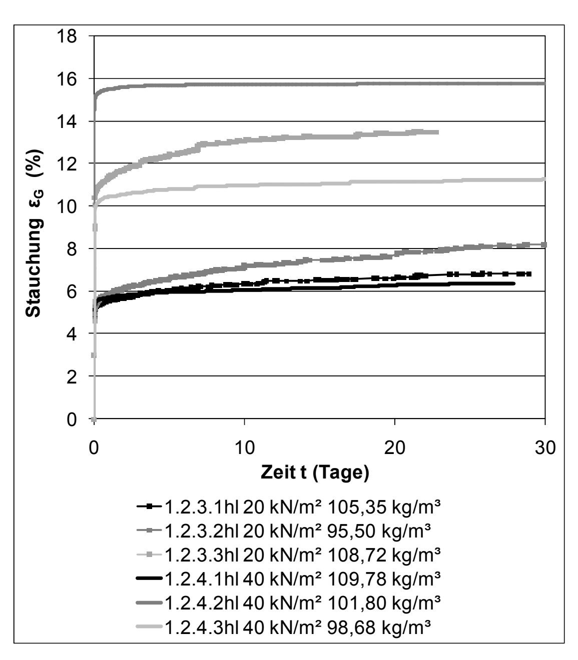


Abbildung 6.4: Gesamtstauchung hochkant liegender HD-Ballen

Tabelle 6.2: Physikalische Balleneigenschaften und Stauchungen hochkant liegender HD-Ballen

Proben-nummer	Abmessungen (m) l	b	h	u (g/g)	ρ_{tr} (kg/m³)	σ (kN/m²)	ε_{K20} (%)	ε_{G20} (%)
1.2.3.1	0,85	0,48	0,36	0,12	105,35	20	2,06	6,64
1.2.3.2	0,85	0,48	0,36	0,12	95,50	20	3,24	7,73
1.2.3.4	0,84	0,48	0,36	0,11	108,72	20	10,76	13,41
Ø 20 kN/m³	0,84	0,48	0,36	0,11	103,19	20	5,36	9,26
1.2.4.1	0,83	0,47	0,36	0,11	109,78	40	1,63	6,28
1.2.4.2	0,83	0,48	0,36	0,12	101,80	40	2,45	15,75
1.2.4.3	0,89	0,48	0,37	0,13	98,67	40	8,40	11,13
Ø 40 kN/m³	0,85	0,48	0,36	0,12	103,42	40	4,16	11,05

u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte; σ: Testspannung; ε_{K20}: Kriechstauchung nach 20 Tagen; ε_{G20}: Gesamtstauchung nach 20 Tagen; Ø Mittelwert aus den betreffenden Werten

7 Kombinierte Relaxations-Kriechtests zur Simulation eines Wasserschadens

Da ein Wasserschaden nur an je einem flach- und hochkant liegenden Ballen durchgeführt wurde, werden die Ergebnisse gemeinsam mit der Diskussion in Teil II Abschnitt 5.8.4 dargestellt.
Der Testablauf wird in Teil II Abschnitt 3.4.2.5 *Simulation eines Wasserschadens (Kriechen),* dargestellt. Tabelle 7.1 listet die physikalischen Balleneigenschaften auf.

Tabelle 7.1: Physikalische Balleneigenschaften und Stauchungen hochkant liegender HD-Ballen

Proben-nummer	Abmessungen (m) l	b	h	u (g/g)	ρ_{tr} (kg/m³)
FL 1.5.8.1	0,873	0,480	0,363	0,10	105
HL 1.5.9.1	0,853	0,372	0,471	0,11	106

FL: Ballen flach liegend; HL: Ballen hochkant liegend; u: Massespezifischer Feuchtegehalt; ρ_{tr}: Trockendichte;

8 Tests an Wänden aus Strohballen

Es wurden sieben Testreihen an Wänden aus Strohballen durchgeführt. Bei fünf davon handelt es sich um Wände aus unverputzten flachliegenden Strohballen, eine Testreihe wurde an einer Wand aus unverputzten hochkant liegenden Strohballen durchgeführt. Eine Wand aus flach liegenden Strohballen wurde mit Lehmputz getestet.

Für den Aufbau der Wände wurden insgesamt 101 HD-Weizenballen benötigt. Die Ballen wurden bei den ersten Tests teilweise mehrfach verwendet.
Bei den Tests mit Wänden aus Strohballen sollte neben dem elastomechanischen Verhalten auch der Aufbau und die Konstruktionsweise der Wandelemente entwickelt und untersucht werden.

8.1 Wandtest 1: Aufbau einer unverputzten Wand aus flach liegenden Strohballen

Ablauf: Die HD-Weizenballen für die Wand wurden mit den unter in Teil II Kapitel 4.4, *Weitere Messinstrumente,* beschriebenen Messinstrumenten gewogen und vermessen, bei Bedarf gekürzt und unverwechselbar gekennzeichnet. Die Wand wurde lagenweise ohne weitere Hilfsmittel aufgeschichtet.

Beobachtungen: In einer Höhe von 4 Ballenlagen war die Wand so instabil, dass keine weitere Lage aufgebracht werden konnte. Die Wand wies am Stoßpunkt der HD-Ballen große Stopflöcher auf.

Ergebnisse: Der Aufbau der Testwand aus HD-Ballen war ohne Hilfsmittel bzw. Hilfskonstruktionen nicht möglich.

Verbesserungen/Weitere Tests: In weiteren Tests sollen Ballennägel (angespitzte Holzleisten oder Bambusstangen) zur Stabilisierung der Wand eingesetzt werden. Wände sollen lagenweise horizontal vorgespannt werden, um die Stopflöcher an den Ballenstoßpunkten zu schließen.

8.2 Wandtest 2: Aufbau einer unverputzten Wand aus flach liegenden Strohballen

Ablauf: Die HD-Weizenballen für die Wand wurden mit den in Teil II Kapitel 4.4, *Weitere Messinstrumente*, beschriebenen Messinstrumenten gewogen und vermessen, bei Bedarf gekürzt und unverwechselbar gekennzeichnet.
Die Ballen aus Wand 1 wurden wieder verwendet.
Die Wand wurde lagenweise aufgeschichtet und nach Bedarf mit einem Holzhammer oder Überzeuger (großer Holzhammer) justiert.

Dabei wurden die einzelnen Lagen über eine Hilfskonstruktion zunächst horizontal mit einer Kraft von ca. 250 N zusammengezogen. Die Hilfskonstruktion bestand zunächst aus einem Spanngurt, der über eine mit Laufrollen versehenen Platte (Abbildung 8.1) lief (Hilfskonstruktion A), später aus zwei Lasteinleitungskonstruktionen, die an beiden Enden der Wand auf die Ballen gesetzt und mittels eines Spanngurtes zusammen gezogen und durch einen zweiten Gurt auch nach dem Abnehmen der Hilfskonstruktion in Position gehalten wurden (Hilfskonstruktion B) (Abbildung 8.1).




Abbildung 8.1: Hilfskonstruktionen zum horizontalen Vorkomprimieren bei Wandtest 2

In die dritte Ballenlage wurde mittig ein 100 cm langer Ballennagel senkrecht eingeschlagen, ebenso in die fünfte und siebente Lage. Die achte Lage wurde auf die gleiche Weise mit einem 60 cm Ballennagel arretiert, die neunte Lage anschließend aufgelegt. Der Verbund mit der oberen Druckplatte wurde durch 10 cm lange Eisennägel hergestellt, die durch die Druckplatte geschlagenen wurden.
Ab der vierten Lage wurde von einem Gerüst aus gearbeitet.
Die neunte Lage wurde aus Stabilitätsgründen wieder abgenommen.
Die Wand, bestehend aus acht Ballenlagen, wurde mittels der beschriebenen Konstruktion unter Spannung gesetzt bis sie sehr stark beulte und sich die obere Druckplatte derart schräg stellte, dass sich die Flachstahlbänder bei einer Spannung von ca. 5 kN/m² verbogen.

Beobachtungen: Die Hilfskonstruktion A erfüllte ihre Aufgabe, die durch das Anspannen der Gurte entstehenden Zugkräfte gleichmäßig zu verteilen, nicht. Die Endballen der so unter Spannung gesetzten Ballenlage tendierten dazu, sich aus der Wandebene schräg zu stellen. Auch gestaltete es sich für eine Person sehr schwierig Platte und Spannband anzubringen.
Die weiterentwickelte Hilfskonstruktion B (siehe Abbildung 8.1) brachte deutliche Vorteile bezüglich Handhabbarkeit und Ergebnis. Die HD-Ballen an den Enden der Wand hoben sich jedoch durch die Zugspannung an ihrem Außenende aus der Horizontalen.
Ab der 3. Ballenlage wurde die Wand so instabil, dass sie nicht mehr betreten werden konnte. Die Ballennägel, die nun eingeschlagen wurden, brachten eine wesentliche Verbesserung. Die Wand stand bis zur 8. Ballenlage allein, kippte jedoch bei der kleinsten Belastung, egal von welcher Seite, und wäre mehrfach umgestürzt, wenn sie nicht durch das Gerüst bzw. eine Stütze gehalten worden wäre.

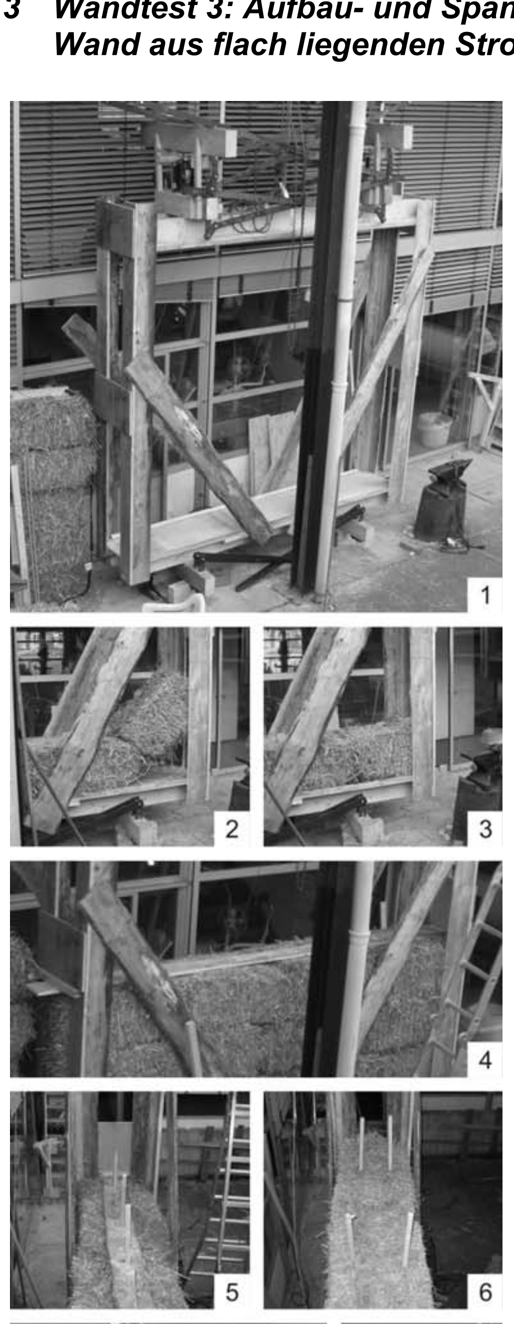



Abbildung 8.2: Testwand 2 vor der Belastung und bei einer Spannung von ca. 5 kN/m²

Ergebnisse: Das Erstellen und sinnvolle Testen der Wand aus HD-Ballen, unterstützt nur durch Ballennägel, war nicht möglich.

Verbesserungen/Weitere Tests: In den weiteren Tests sollen horizontale Bohlen in die Wand eingelegt werden, um vertikales Beulen der Wand zu verhindern und um den Ballennägeln Halt zu geben.
Des Weiteren sollen die Wände eine seitliche Begrenzung erhalten, die ein horizontales Spannen überflüssig machen und zu einer weiteren Stabilisierung der Wand beitragen sollen. Die aus der Vertikalkraft und den horizontalen Vorspannkräften entstehende Horizontalkraft soll ermittelt werden, um eine Dimensionierung von Zugelementen in der Wand zu ermöglichen.

8.3 Wandtest 3: Aufbau- und Spannungs-Stauchungstest einer unverputzten Wand aus flach liegenden Strohballen mit seitlicher Einspannung



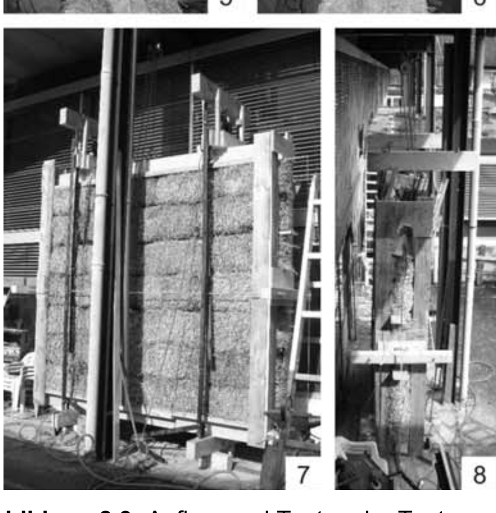


Abbildung 8.3: Aufbau und Testen der Testwand 3

Ablauf: Die seitlichen Begrenzungs- und Stabilisierungselemente wurden angefertigt, lotrecht an der unteren Lasteinleitungsplatte befestigt und mit Hilfe von Diagonalen stabilisiert (1 in Abbildung 8.3). Auf die untere Lasteinleitungsplatte wurden an den Außenkanten Dreieckleisten aufgebracht um ein Verrutschen der Strohballen zu verhindern. Die Ballen aus Wand 2 wurden teilweise wieder verwendet, neue Ballen für die Wand wurden gewogen, vermessen und unverwechselbar gekennzeichnet. Bei Bedarf wurden die Ballen gekürzt.

Die Wand wurde lagenweise aufgeschichtet und nach Bedarf mit einem Holzhammer oder Überzeuger justiert. Dabei lag die Summe der Längen der Ballen ca. 3-5% über der Länge der späteren Wand (2 in Abbildung 8.3), die Ballen wurden zwischen die seitlichen Begrenzungen gedrückt (3).

Nach der dritten Lage wurde eine 16 cm breite und 2,4 cm starke Bohle eingelegt (4). In diese Bohle wurden zur Aufnahme der Ballennägel pro Ballen zwei Löcher gebohrt. Die Ballennägel mit einer Länge von 100 cm wurden eingeschlagen (5). Zur Aufnahme von Zugkräften wurde an den Enden der Bohle, die aus der seitlichen Begrenzung herausragten, ein Riegel angebracht. In die folgende Ballenlage wurden pro Ballen zwei 100 cm lange Ballennägel so eingeschlagen, dass sie innerhalb der Garnbindungen knapp an der Bohle vorbei in die unteren Ballenlagen drangen (6). Über die fünfte Ballenlage wurde eine weitere Bohle gelegt und mit 60 cm langen Ballennägeln fixiert. Die sechste Ballenlage wurde wie die vierte arretiert. In die siebente wurden 60 cm lange Ballennägel eingeschlagen.

Der Verbund mit der oberen Lasteinleitungsplatte wurde mittels Dreieckleisten an den Außenkanten der Platte hergestellt.

Nun wurden über zwei Joche und Gewindestangen beide seitlichen Begrenzungen gespannt. Zwischen Begrenzung und Joch wurde eine Kraftmessdose platziert. Die Riegel an den Bohlen zur Aufnahme der horizontalen Zugkräfte sowie die diagonalen Streben wurden entfernt und die Verbindung der Begrenzungen mit der unteren Druckplatte so verändert, dass keine Horizontalkräfte übertragen werden konnten. Alle Horizontalkräfte, die auf die seitlichen Begrenzungen wirkten, wurden so in die Kraftmessdose eingeleitet (7).

Der Spannungs-Stauchungstest begann, die Wandhöhe (2 Messpunkte), die Druckkraft der

beiden vertikal wirkenden Zylinder sowie die Horizontalkraft wurden aufgenommen.
Bei einer Spannung von 19 kN/m² hatte einer der Zylinder seinen maximalen Hub erreicht. Die Konstruktion wurde umgespannt und der Test fortgesetzt.
Bei einer Spannung von 30 kN/m² wurde der Test aufgrund einer übermäßigen Schrägstellung der oberen Lasteinleitungsplatte beendet (8). Die Wand wurde anschließend abgebaut.

Beobachtungen: Durch das Eindrücken der Ballen zwischen die seitlichen Begrenzungen wurden die Stopflöcher deutlich verkleinert. Wird die Spannung durch das Eindrücken zu hoch, knickt die Ballenlage seitlich aus. Begrenzungen und Vorspannung durch das Eindrücken der Ballen gaben der Wand eine erfreuliche Stabilität. Bohlen und Ballennägel verfestigten die Wand sehr.
HD-Ballen scheinen in der Mitte zwischen den Bindungen dichter als am Rand zu sein. Zusätzlich liegt in der Mitte der Wand die Bohle. Dadurch war die Ballenlage über den Bohlen bevor die Nägel eingeschlagen worden waren instabil. Die Wand wurde ohne Gerüst aufgebaut und wies eine so hohe Festigkeit auf, dass auf der Wand gearbeitet werden konnte. Zwischen den seitlichen Begrenzungselementen und den eingelegten Bohle ergab sich ein Spiel von ca. 4 cm (5). Während des Tests verrutschte die Bohle horizontal bis zu den seitlichen Begrenzungselementen.
Das Einstellen der Flachstahlverbindungen sowie das Umsetzen der Zylinder gestalteten sich deutlich zeitaufwändiger als gedacht. Die Zylinder selbst erfüllten ihren Zweck hervorragend bis auf die Schrägstellung.

Ergebnisse: Die Wandkonstruktion ist den bisher aufgebauten deutlich überlegen. Der Einsatz der seitlichen Begrenzungen sowie der Bohlen hat sich ebenso bewährt wie die horizontale Vorspannung durch das Eindrücken der Ballen zwischen die seitlichen Begrenzungen.
Das Verhältnis von Horizontal- zu Vertikalspannung betrug etwa 1:10.
Die Stauchung verlief mit zunehmender Vertikalspannung annähernd linear und betrug bei einer Vertikalspannung von 30 kN/m² ca. 23 cm entsprechend 9 %.

Verbesserungen/Weitere Tests: Vor weiteren Tests muss die Anordnung der Druckzylinder dahingehend verändert werden, dass eine Schrägstellung der oberen Druckplatte minimiert wird. In den folgenden Tests soll eine deutlich höhere Spannung gefahren werden. Die Bohlen könnten durch horizontale Aussteifungselemente am Rand der Wand ersetzt werden. Durch das Material am Rand der Wand, wo die Ballen weniger dicht sind als in der Mitte, ergäbe sich vermutlich eine gleichmäßigere Spannungsverteilung, ein geringeres Kippmoment der Ballenlage über dem Aussteifungselement und dadurch eine höhere Stabilität der Wand.
Die gegen Ausbeulen in die Wand eingelegten Bohlen sollten gegen seitliches Verrutschen gesichert werden.

8.4 Wandtest 4: Verbesserung des Prüfstandes

Ablauf/Beobachtungen: Testwand 4 wurde analog zu Testwand 3 aufgebaut. Es wurden die gleichen Strohballen verwendet. Als Verbesserung gegenüber Testwand 3 wurden die horizontalen Bohlen gegen seitliches Verrutschen gesichert.



Abbildung 8.4: Arretierung der horizontalen Bohle bei Testwand 4

Im Unterschied zu Wand 3 wurden die Druckzylinder über Kopf eingebaut und am Fuß biegesteif mit dem Oberjoch verbunden. Diese Maßnahme sollte das Schrägstellen der oberen Druckplatte verhindern. Jedoch wurde zu Beginn des Testes festgestellt, dass die Zylinder über Kopf nicht arbeiten. Ein Vorversuch hätte deutlich Arbeit und Frust sparen können. Die Zylinder wurden an der Oberseite mit biegesteifen Anschlüssen versehen und eingebaut. Leider kippte nun unter Belastung das Oberjoch in Wandrichtung ab.

Verbesserungen/Weitere Tests: Es ist notwendig, eine stabile Konstruktion mit seitlicher Führung der Joche zu konstruieren.

8.5 Wandtest 5: Spannungs- Stauchungs- Relaxations- und Horizontalkrafttest an einer unverputzten Wand aus flach liegenden HD-Weizenballen

Ablauf: Es wurde die bestehende Wand aus Wandtest 4 verwendet. Der Testablauf gleicht dem aus Test 3. Das Oberjoch wurde bei 22 kN/m² umgesetzt und der Test bis zu einer Spannung von 40 kN/m² fortgesetzt. Danach wurde die Relaxation über einen Zeitraum von einem Monat gemessen. Anschließend wurde die Wand einem Horizontallasttest unterzogen.

Beobachtungen: Überraschender Weise erwies sich selbst der Stahlrahmen als so weich, dass er durch ein Schrägstellen der Joche auseinandergedrückt wurde. Beim Umsetzten des Oberjoches wurde daher eine Gewindestange als Zugelement eingebracht. Da sich die Lasteinleitungsplatte schräg gestellt hatte, wurden die Zylinder beim Umsetzten aus der Mitte verschoben um die Schrägstellung zu korrigieren. Rechts wurde die Schrägstellung überkompensiert, dies führte zu einem Verdrehen der Wand und zu einem Ausbeulen der Begrenzungselemente an dieser Seite. Die Möglichkeit, die Zylinder an einer beliebigen Stelle zwischen den Jochen einzusetzen, erwies sich somit als sehr vorteilhaft.

Ergebnisse: Insgesamt verlief der Test überaus erfolgreich. Die Stauchung von 9% fiel deutlich geringer als erwartet aus. Zum Ende des Relaxationstests nach 713 Stunden betrug die Restspannung noch 50,4% der Ausgangsspannung. Im Horizontallasttest ergab sich am Wandkopf eine Verformung von 180,35 mm bei einer Kraft von 5,14 kN. Nach dem Entfernen der Last nahm die Wand annähernd ihre ursprüngliche Position wieder ein.

Verbesserungen/Weitere Tests: Bei weiteren Tests sollte die Nutzung der Möglichkeit, die Zylinder zwischen den Jochen zu verschieben, vorsichtiger eingesetzt werden. Standardmäßig sollten direkt über den Oberjochen Gewindestangen als Zugelemente eingebaut werden.

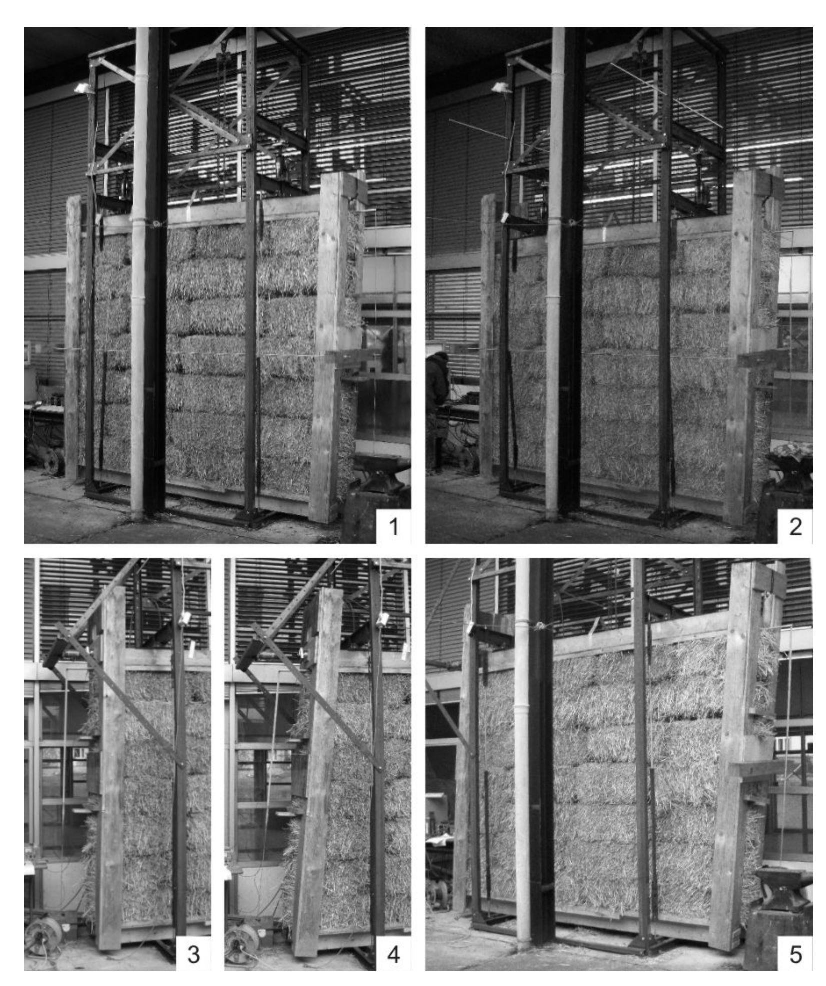


Abbildung 8.5: Wandtest 5: Wand vor der Belastung (1), bei einer Spannung von 40 kN/m² (2), vor dem Horizontallasttest (3) und bei einer Horizontalkraft von 5,14 kN (4, 5)

8.6 Wandtest 6: Aufbau-, Spannungs-, Stauchungs- und Relaxationstest an einer unverputzten Wand aus hochkant liegenden HD-Weizenballen

Ablauf: Aus Sperrholzplatten(22 mm) wurden U-förmige seitliche Begrenzungselemente hergestellt und auf der unteren Lasteinleitungsplatte aufgerichtet. Auf der unteren Lasteinleitungsplatte wurden Dachlatten gegen das Verrutschen der Ballen aufgeschraubt. Die ersten drei Lagen aus hochkant liegenden Ballen wurden analog zu den vorigen Tests zwischen den U-Profilen eingebaut (1). Anstatt einer Bohle wurde auf dritte Ballenlage ein Leiterelement, bestehend aus vier Dachlatten als Leiterholme und Sperrholzstreifen als Sprossen, gelegt. In die Sprossen wurden Löcher zur Aufnahme der Ballennägel gebohrt. Pro Ballen wurden nun zwei 13 cm lange Ballennägel eingeschlagen (2).



Abbildung 8.6: Aufbau der Wand zu Wandtest 6: Die ersten drei Ballenlagen sind zwischen die U-Profile eingebaut (1), Leiterrahmen und Ballennägel auf der dritten Lage (2)

Die nächste Ballenlage wurde eingebracht und genagelt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Ballennägel nicht die Sprossen trafen. Mit der fünften Lage wurde analog verfahren. Anschließend wurde die mit Dachlatten gegen das seitliche Verrutschen der Ballen ausgerüstete obere Lasteinleitungsplatte aufgebracht und der Spannungs-Dehnungstest begonnen. Der Testablauf gleicht dem aus Test 3. Das Oberjoch wurde bei 25,93 kN/m² umgesetzt und der Test bis zu einer Spannung von 40 kN/m² fortgesetzt. Danach wurde die Relaxation über einen Zeitraum von einem Monat gemessen.

Beobachtungen: Die Wand erwies sich beim Aufbau als ausgesprochen stabil. Der Leiterrahmen, der die Ballen über die gesamte Wandlänge hält, erwies sich als sehr vorteilhaft.

Ergebnisse: Insgesamt verlief der Test überaus erfolgreich. Bei 40 kN/m² lag die Stauchung bei lediglich 7,3%. Nach 734 Stunden lag die Restspannung bei 38,8% des Startwertes.

8.7 Wandtest 7: Aufbau-, Spannungs-, Stauchungs- und Relaxationstest sowie Horizontallasttest an einer verputzten Wand aus flach liegenden HD-Weizenballen

Ablauf: Zunächst wurde ein Leiterrahmen aus 58/78 Kanthölzern aufgebaut. In die Sprossen der Leiter wurden Löcher zur Aufnahme angespitzter Buchenrundstäbe gegen das Verrutschen der Ballen eingelassen. Die Buchenrundstäbe wurden in die Löcher eingeschlagen und 78/78 Kanthölzer an den Seiten der Wand aufgerichtet und mittels BMF-Winkeln befestigt (1 in Abbildung 8.7). Strohballen wurden gewogen und vermessen und nach Bedarf gekürzt. Die Endballen jeder Lage wurden mittels eines Elektrofuchsschwanzes entsprechend den Kanthölzern ausgeklinkt (2 in Abbildung 8.7). Die ersten vier Lagen aus flach liegenden Ballen wurden aufgeschichtet, justiert und mit Bambusstecken genagelt. Die 6. Lage wurde wieder genagelt, dann wurde eine 5/250 Bohle, die entsprechend den Holzpfosten ausgeklinkt war, aufgelegt. Mit einem großen Holzhammer wurden überstehende Ballen und Ungleichmäßigkeiten in der Wand plan geschlagen (3). Nun wurde die Wand mittels Paketspannbändern vorgespannt. Dazu wurden die Paketbänder mittels eines Spanners angezogen, während mit einem großen Holzhammer auf die Bohle geschlagen wurde (4, 5). Die Vorspannung wurde durch das Aufbringen einer Last bis zum Stauchen der Wand ermittelt. Die aus den Ballen herausstehenden Strohhalme wurden mit einer Heckenschere abrasiert (6).
Nun wurde eine erste Lehmschicht in die Wand einmassiert und anschließend eine zweite Lage in nass aus Gumbel Grubenlehm aufgebracht (7, 8). Nach dem Trocknen dieser Lagen wurde die dritte Putzlage aus Maxit IP334 Lehm grob aufgezogen.

Abbildung 8.7: Aufbau der Testwand 6

Nach dem Trocknen dieser Lage wurde die Wand bis 40 kN/m² belastet. Sodann schloss sich ein Relaxationstest über einen Monat an. Danach wurde ein Horizontallasttest durchgeführt und die Wand abschließend vertikal bis zum Bruch belastet.

Beobachtungen: Das Herstellen des Leiterrahmens erwies sich als zeitaufwändig. Die Wand war während des Aufbaus stabil, neigte jedoch zu horizontalem Ausbeulen während des Aufbaus. Das Aufbringen und Befestigen der Abschlussbohle beendete diese Tendenz. Das Vorspannen mittels der Verpackungsbänder erhöhte die Stabilität nochmals deutlich. Eine Stauchung der Wand durch den Spannungs-Stauchungstest bis 40 kN/m² war mit bloßem Auge nicht zu erkennen.

Durch den Horizontallasttest wurde der Prüfrahmen stark verzogen. Da die Verformungsmessung unabhängig vom Prüfrahmen stattfand, wurden die Messergebnisse nicht verfälscht. Das Versagen der Wand in horizontaler Richtung erfolgte durch eine Zerstörung des Putzes im Bereich der Lasteinleitung (1 in Abbildung 8.8). Bei dem sich anschließenden Spannungs-Stauchungstest brach der Putz im Bereich der Lasteinleitungsplatte und der durch den Horizontallasttest entstandenen Putzbeschädigungen (2 in Abbildung 8.8).



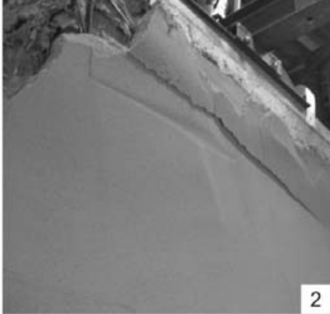


Abbildung 8.8: Putzbrüche infolge von Horizontalspannung (1) und Vertikalspannung (2)

Ergebnisse: Durch das Vorspannen wurde eine Spannung von etwa 10 kN/m² erreicht. Dabei wurde die Wand um 95,5 mm, entsprechend 4,4%, gestaucht.

Die Stauchung der verputzten Wand betrug bei 40 kN/m² 0,375 mm entsprechend 0,018%. Die Restspannung betrug nach 485 Stunden noch 32,3% des Startwertes.

Bei dem anschließenden Horizontallasttest wurde eine Kraft von maximal 25,14 kN erreicht. Die Wand versagte beim finalen Spannungs-Stauchungstest durch den Bruch des Putzes im Bereich der Lasteinleitung bei einer Spannung von ca. 57 kN/m².

8.8 Wandtest 8: Aufbau-, Spannungs-, Stauchungs- und Relaxationstest an einer unverputzten Wand aus flach liegenden HD-Weizenballen

Ablauf/Beobachtungen: Aufbau und Testablauf erfolgten analog zu 8.7. Es wurde Gleiches beobachtet. Die Wand wurde jedoch nicht verputzt. Nach dem Vorspannen und einer Relaxationszeit von einem Monat wurde die Wand bis 40 kN/m² belastet und die Verformungskennlinie aufgenommen. Ab ca. 30 kN/m² beulte die Wand einseitig sehr stark aus. Es schloss sich ein Relaxationstest an. In die Auswertung der Relaxationsergebnisse gehen nur die Werte eines der beiden Kraftsensoren ein, da der andere vermutlich aufgrund der Beule in der Wand sehr niedrige Werte aufwies.

Ergebnisse: Durch die Vorspannung wurde die Wand bei einer Spannung von 13,8 kN/m² um 4,6% gestaucht. Nach dem anschließenden Relaxationstest war die Spannung nach 573 Stunden auf 35,7% des Ausgangswertes gesunken.
Im Spannungs-Stauchungstest wurde die Wand nochmals um 2,9% bei 40,4 kN/m² gestaucht. Nach weiteren 788 Stunden Relaxation war die Spannung auf durchschnittlich 18,73% gesunken. Dabei lag der Wert der einen Messstelle bei 10,5%, der der anderen bei 41%.



Abbildung 8.9: Ausbeulen der Wand aus Test 8

Anhang III.1: Prinzipielle Überlegungen zu Vorspannsystemen für lasttragende Strohballenwände

1 Übersicht zu möglichen Vorspannsystemen

Vorspannsysteme werden benötigt, um
1. spätere Setzungen vorwegzunehmen
2. zu verhindern, dass sich bei alternierender Verkehrslast die Höhe der Räume ändert.

Aus diesen Gründen wird vor dem Verputzen der Wände eine Vorspannung aufgebracht, die der maximalen Last entspricht, für die das Gebäude konstruiert wurde. Schwankt nun die Verkehrslast, wird lediglich die Spannkonstruktion mehr oder weniger belastet, die Gesamtlast auf die Strohwände (die sich aus der Eigenlast, der Auflast und der Vorspannkraft zusammensetzt, bleibt gleich.
Folgende Grafik, die im Anschluss erläutert wird, zeigt ein Organigramm möglicher Vorspannsysteme.

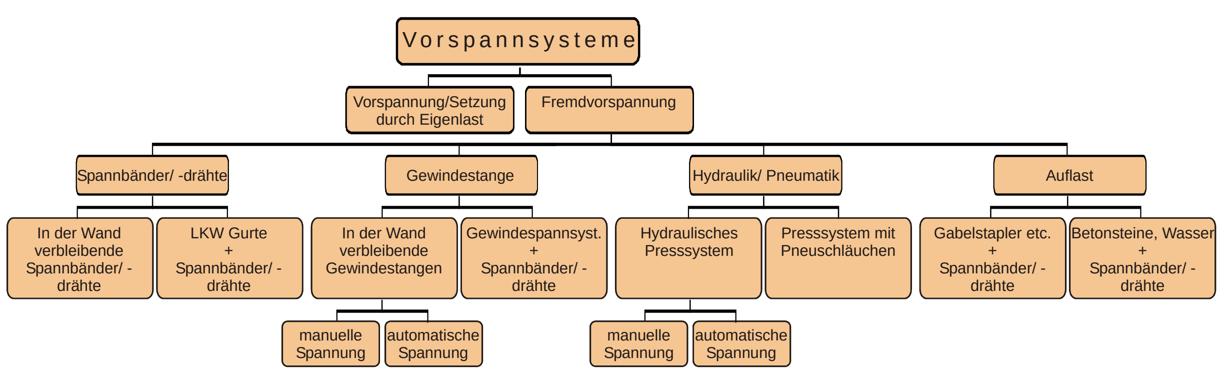


Abbildung 1.1: Systematik möglicher Vorspannsysteme

2 Vorspannung/ Setzung durch Eigenlast

Nach dem Motto „kein System kann auch ein System sein“ wird hier die Vorspannung bzw. Setzung durch Eigenlast angeführt und besticht vor allem durch Einfachheit. Es wird erfolgreich von Werner Schmidt[1] in der Schweiz eingesetzt. Nach dem Aufsetzen der Strohballen und dem Errichten des Daches wartet Schmidt sechs Wochen bis sich die Konstruktion gesetzt hat und bringt dann den Putz so auf, dass dieser keine kraftschlüssige Verbindung mit Boden oder Ringbalken bildet. Auf die Frage, ob es den Probleme mit wechselnden Verkehrslasten, Wind und Schnee gäbe, antwortet Schmidt: „Es steht doch noch, oder?“. Ob und wie viel sich die Konstruktion unter wechselnder Last dehnt oder kriecht, wurde nicht untersucht. Fest steht, dass der Putz hält - rissfrei. Allerdings ist zu erwähnen, dass Schmitt flach liegende Quaderballen verwendet, bei denen sich die Dachlast auf die 1,2 m dicken Wände verteilt und vergleichsweise geringe Spannungen hervorrufen.
Bei dieser Methode sind Setzungen der Bauteile infolge wechselnder Lasten wahrscheinlich. In Deutschland scheint die Anwendung dieser überzeugend einfachen Methode daher nicht möglich zu sein, obwohl z.B. auch Blockbohlenbauten ihre Höhe im Laufe eines Jahres ganz erheblich ändern. Solange die Anschlüsse dem Rechnung tragen, funktionieren diese Gebäude.

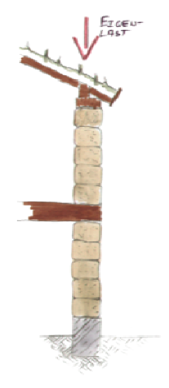


Abbildung 2.1: „Vorspannung“ durch Eigenlast

[1] Werner Schmidt: Schweizer Architekt, Forscher und Strohballenpionier. Baut in lasttragender Bauweise bis zu zwei Vollgeschossen

3 Fremdvorspannung

Soll die Ballenwand sofort verputzt werden und sind Änderungen in der Gebäudehöhe durch alternierende Lasten unerwünscht oder nicht genehmigungsfähig, werden Fremdvorspannungen nötig. Verschiedene denkbare Möglichkeiten werden folgend erläutert.

3.1 *Spannbänder und Spanndrähte*

Eine verbreitete Möglichkeit, Strohballenwände vorzuspannen, ist die Komprimierung mit LKW-Spanngurten. Diese Gurte werden normalerweise dazu eingesetzt, LKW-Fracht auf der Ladefläche zu arretieren. Beim Strohballenbau werden die Spannbänder durch hierfür vorgesehene Aussparungen im Fundament und über den oberen Abschluss der Strohballenwand, den Ringbalken, gelegt. Die Bänder werden wie beim Festzurren der Ladung eines LKW mittels Spannschlössern gespannt (primäres Spannsystem). Da LKW-Spanngurte und vor allem die dazugehörigen Spannschlösser teuer sind, wird nach Erreichen der gewünschten Kompression die Wand durch andere Spannbänder oder Spanndrähte arretiert (sekundäres Spannsystem) und die LKW Spanngurte wieder entfernt. Diese Technik wird beispielsweise von „Amazon Nails" und Barbara Jones[2] in Groß Britannien eingesetzt. Die LKW-Spanngurte können durch beliebige andere Systeme, wie z.B. Kettenzüge, Klemmzüge oder Gewindespannschlösser, die den gleichen Zweck erfüllen, ersetzt werden.
Denkbar sind auch Systeme, bei denen das sekundäre Spannband in der Wand verbleibt. Hierdurch würde ein Arbeitsschritt eingespart werden.

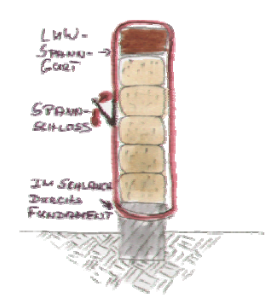


Abbildung 3.1: Vorspannung durch LKW-Spanngurte

[2] Barbara Jones ist die Gründerin von „Amanzon Nails", einer britischen Gruppe, die es insbesondere Frauen ermöglichen möchte, ihre eigenen Wohnungen zu bauen. „Amazon Nails" kommt es dabei nicht nur auf preisgünstiges und ökologisches Bauen an, sondern auch auf die soziale Komponente der Herstellung des eigenen Heims gemeinsam mit Anderen.

3.2 *Gewindestangen*

Auch hier lassen sich Systeme unterscheiden, bei denen die Gewindestange in der Wand verbleibt und solche, bei denen ein Gewindespannsystem nur der Kompression dient und anschließend entfernt wird. Spannsysteme, bei denen Gewindestangen in der Wand verbleiben, sind z.B. in den Vereinigten Staaten verbreitet. Eine Gewindestange wird im Fundament einbetoniert, die Ballen der Wand werden über sie gespießt, der Ringbalken aufgefädelt. Mit einer Mutter kann der Ringbalken nach unten geschraubt werden, bis die gewünschte Kompression bzw. Wandhöhe erreicht ist. An den überstehenden Gewindestangen kann die Dachkonstruktion befestigt werden. Diese an sich sehr elegante Methode hat den Nachteil, dass am Stahl der Gewindestange mit seinem niedrigen Taupunkt schnell Wasser kondensieren kann. Als mögliche Folge muss in hiesigen Klimazonen mit Schimmelpilzbildung und einem Verrotten der Wand gerechnet werden.

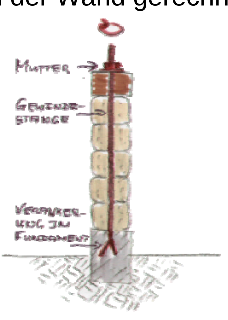


Abbildung 3.2: Vorspannung mittels in der Wand verbleibender Gewindestange

Eine viel versprechende Möglichkeit scheint das Niederspannen der Wand mit zwei, über ein Joch verbundenen Gewindestangen beidseitig der Wand zu sein. Das Drehen der Muttern bzw. Stangen kann manuell oder zweckmäßigerweise auch maschinell erfolgen. Hierzu wäre eine Steuerung notwendig, die ein simultanes Pressen auf beiden Seiten (und evtl. an mehreren Stellen) der Wand sicherstellt.

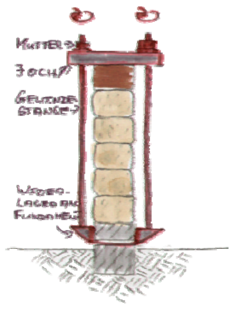


Abbildung 3.3: Vorspannung mittels Gewindestangensystem

3.3 Hydraulische und pneumatische Systeme

Ähnlich dem unter „Gewindestangen“ vorgestellten System mit zwei Spannstangen und einem verbindenden Joch ist eine Variante denkbar, bei der ein Hydraulikzylinder die Wand gegen eine Joch, gehalten von z.B. zwei Ketten beidseitig der Wand komprimiert. Die Presskraft könnte durch den Hydraulikdruck recht einfach und präzise geregelt werden. Es sind mehr oder minder automatisierte Systeme (Handhydraulikpumpe/ Motorpumpe, automatische Errechnung des erforderlichen Hydraulikdruckes…) denkbar. Eine Variante dieses Systems wurde in der vorliegenden Dissertation zum Testen des elastomechanischen Verhaltens von Strohballenwänden eingesetzt.

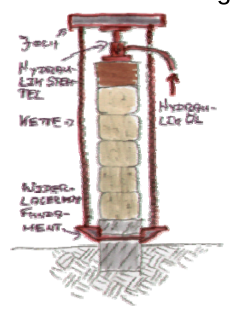


Abbildung 3.4: Vorspannung mit einem hydraulischen System

Ein pneumatisches System wurde von den Firmen „Fibre House Ldt.“ (Kanada) und „Huff'n Puff Constructions“ (Australien) entwickelt. Dabei wird ein „Schlauch“ zwischen zwei Ringbalken gelegt, wovon der eine auf der Strohballenwand aufliegt und in der Wand verbleibt, der andere als Widerlager für den Schlauch fungiert und zum Fundament hin abgespannt ist. Mittels eines Kompressors wird Druckluft in den Schlauch gepresst, dieser bläht sich auf und komprimiert die Wand. Schlauch und oberer Ringbalken werden nach dem Abschließen des Pressens und der Arretierung durch ein sekundäres Spannsystem wieder entfernt. Nachteilig ist, dass für jede Wandlänge ein passender Schlauch vorgehalten werden muss.
Dirk Scharmer[3] verwendete beim Bau von „Stropolis“, einem nicht lasttragenden Strohballenhaus im Öko-Dorf Sieben Linden Pressluftkissen, die je nach Erfordernis aneinandergereiht, den Schlauch ersetzten. Es stellt sich allerdings die Frage, ob mit diesem System die für den lasttragenden Strohballenbau notwendigen Kräfte aufgebracht werden können.

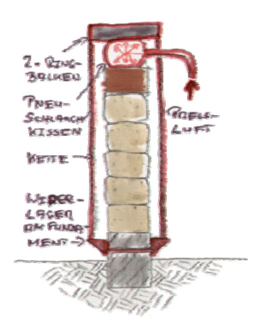


Abbildung 3.5: Vorspannung mit einem pneumatischen System

3.4 Auflast

Dirk Scharmer verwendete bei einem nicht lasttragenden Strohballengebäude einen Teleskoplader, um eine Strohballenwand vorzukomprimieren. Diese Methode ist auf den Lasttragenden Strohballenbau übertragbar. Zum Arretieren der Wand im komprimierten Zustand würden auch hier Spannbänder oder Spanndrähte zum Einsatz kommen.

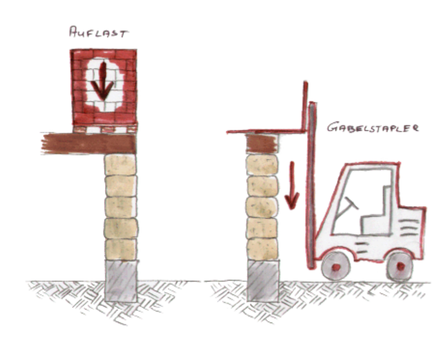


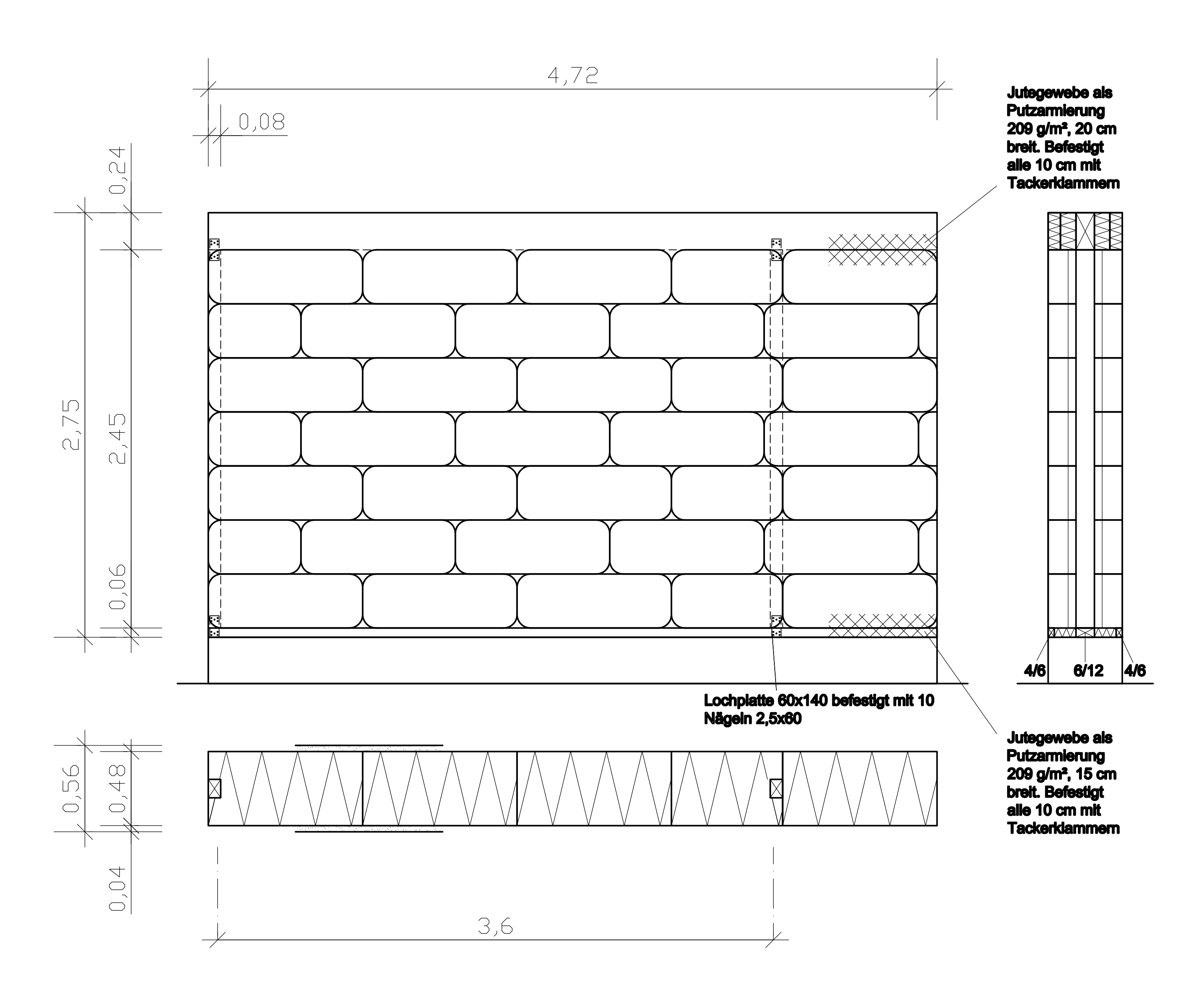
Abbildung 3.6: Vorspannung durch Auflast

Eine weitere Möglichkeit könnte das Aufbringen von Lasten (Betonsteine, textile Wasserbecken etc.) auf Wände, Zwischendecken oder Dächer sein. Beim Aufbringen solcher Lasten auf Wände ist darauf zu achten, dass diese nicht umstürzen können. Bei Decken muss die Last so verteilt werden, dass einzelne Deckenteile nicht überbeansprucht werden, gleiches gilt für Dächer. Wie zuvor kämen auch hier Spannbänder oder Spanndrähte zum Einsatz um die Vorspannung aufrecht zu erhalten.
Die Realisierung dieser Methode scheint zwar vom System her preiswert, jedoch (evtl. mit Ausnahme textiler Wasserbecken) sehr arbeitsaufwändig zu sein.

[3] Dirk Scharmer ist Architekt, deutscher Strohballenpionier und geschäftsführender Vorsitzender des FASBA.

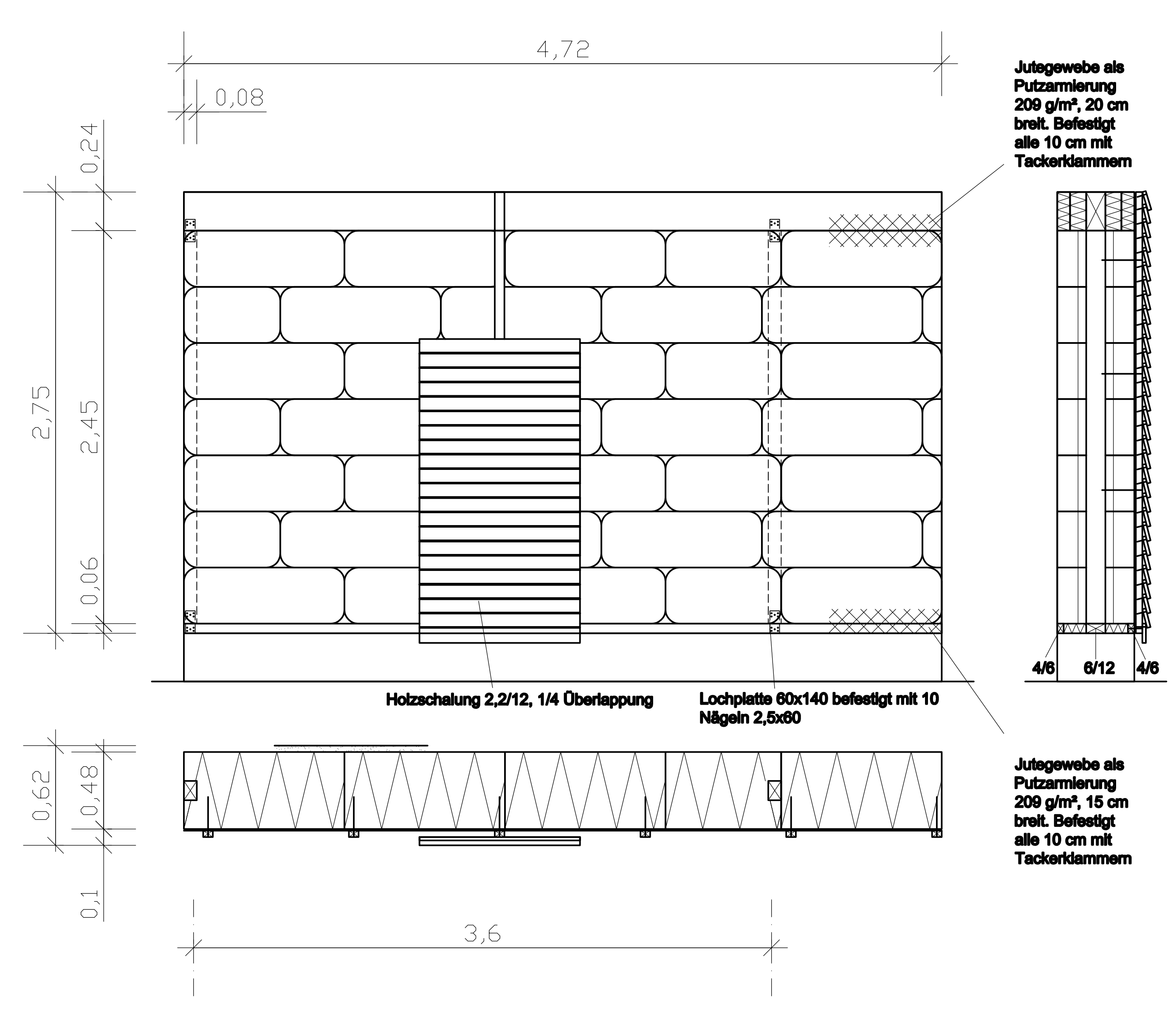
Anahng III.2: Zeichnerische Darstellung und Beschreibung der untersuchten Strohballenkonstruktionen

1.1 Innenskelett (Putz–Putz)



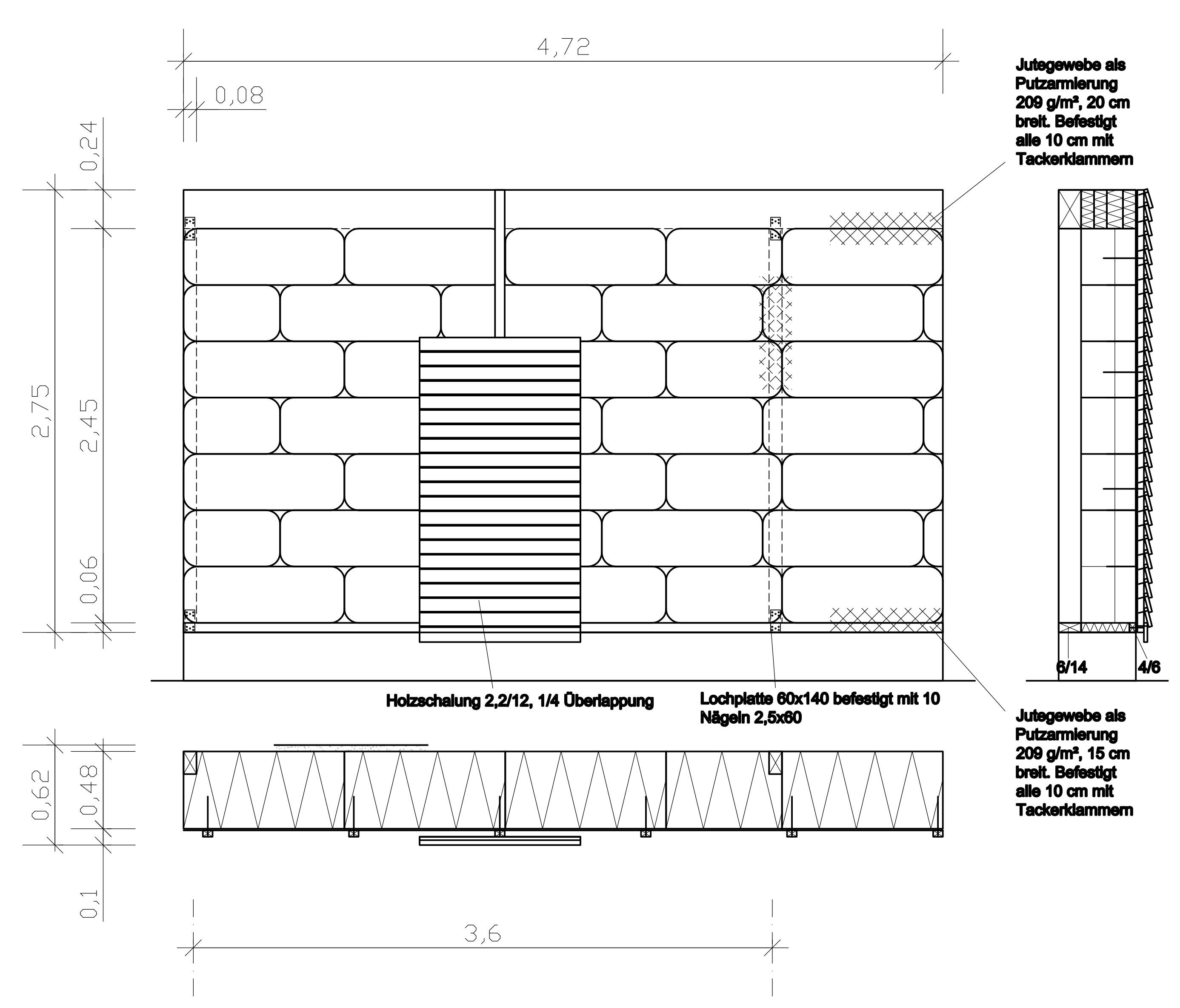
Verbindung Stütze Schwelle + Stütze Pfette mit Lochplatten 60x140 und je 10 Nägeln. Pro Stütze 4 Lochplatten, 40 Nägel x 2,3 Stützen = 9,2 Lochplatten, 92 Nägel.
Pfette ballenbreit mit Holzweichfaserplatte überdämmt (2x0,18mx0,24mx4,72m=0,41 m³).
20 cm breiter Jutestreifen (200 g/m²) als Putzarmierung über den Anschluss Ballen-Holzweichfaserplatte, 15 cm breiter Streifen über Übergang Ballen-Lagerholz (2x0,2x4,72+2x0,14x4,72= 3,3 m²), angeheftet mit Tackerklammern alle 10 cm (4x4,72mx10=200).
Raum zwischen Schwelle und äußeren Lagerhölzern aufgefüllt mit Perliten (2x0,14mx0,06mx4,72m=0,08 m³)
Beidseitig 4 cm Lehmputz, mehrlagig aufgebracht.

1.1a Innenskelett (Putz-Schalung)



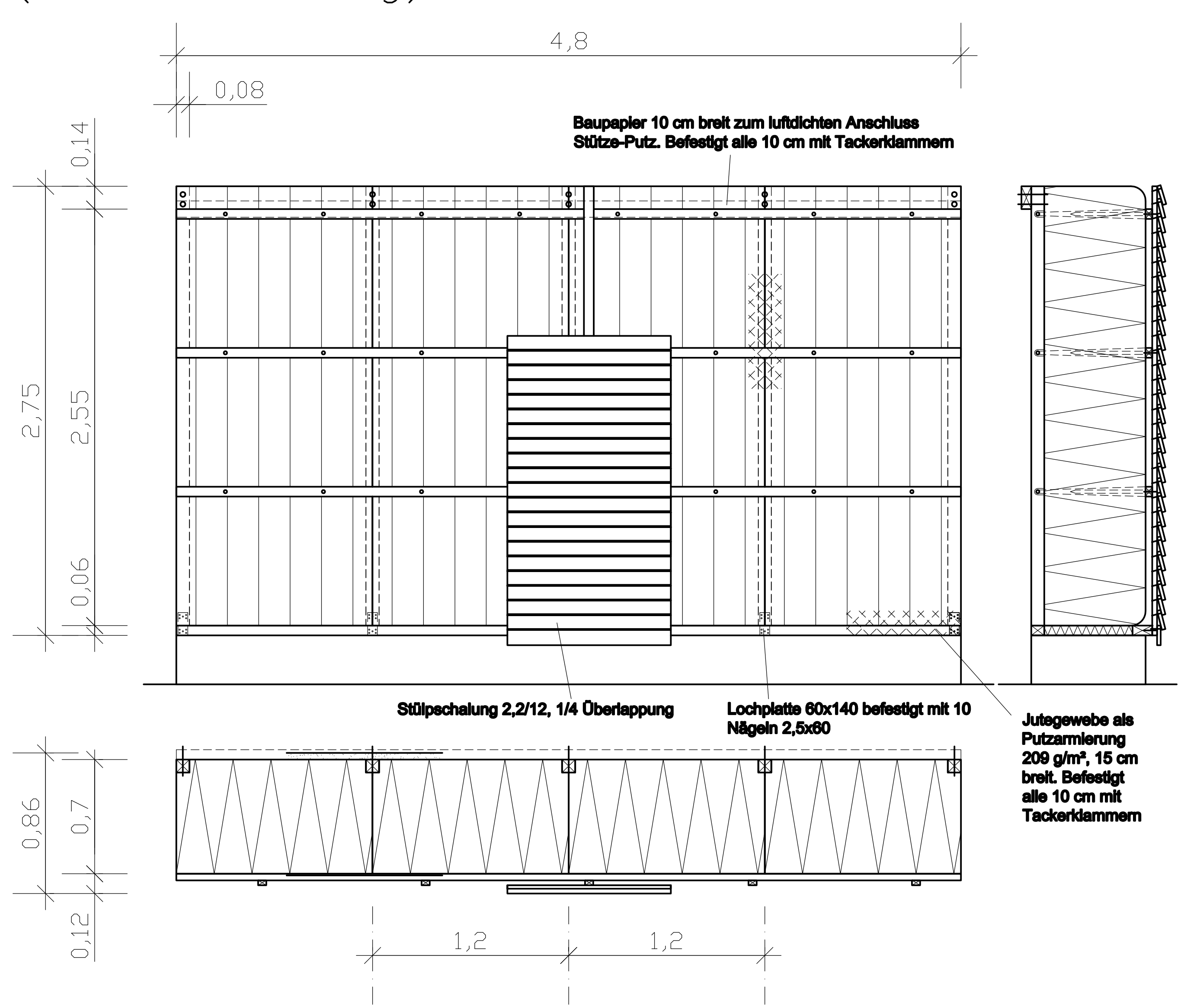
Verbindung Stütze Schwelle + Stütze Pfette mit Lochplatten 60x140 und je 10 Nägeln. Pro Stütze 4 Lochplatten, 40 Nägel x 2,3 Stützen = 9,2 Lochplatten, 92 Nägel.
Pfette ballenbreit mit Holzweichfaserplatte überdämmt (2x0,18mx0,24mx4,72m=0,41 m³).
20 cm breiter Jutestreifen (200 g/m²) als Putzarmierung über den Anschluss Ballen-Holzweichfaserplatte, 15 cm breiter Streifen über Übergang Ballen-Lagerholz (2x0,2x4,72+2x0,14x4,72= 3,3 m²), angeheftet mit Tackerklammern alle 10 cm (4x4,72mx10=200).
Raum zwischen Schwelle und äußeren Lagerhölzern aufgefüllt mit Perliten (2x0,14mx0,06mx4,72m=0,08 m³)
Innenseite 4 cm Lehmputz, mehrlagig aufgebracht, Außenseite 1 cm Lehmputz.
Lattung 4/6, 6 Latten über die Wand verteilt. Befestigt mit je drei Strohschrauben: 3 Schrauben x 6 Latten = 18 Schrauben und einer Schraube 6x80 pro Latte.
Stülbschalung 2,2/12, 1/4 Überlappung = 31 Bretter für 2,75 m. Befestigt mit einer Bauschraube 4,5x60 pro Brett und Ständer= 31x6=186 Schrauben

1.2 Ballenbündiges Skelett (Putz–Schalung)



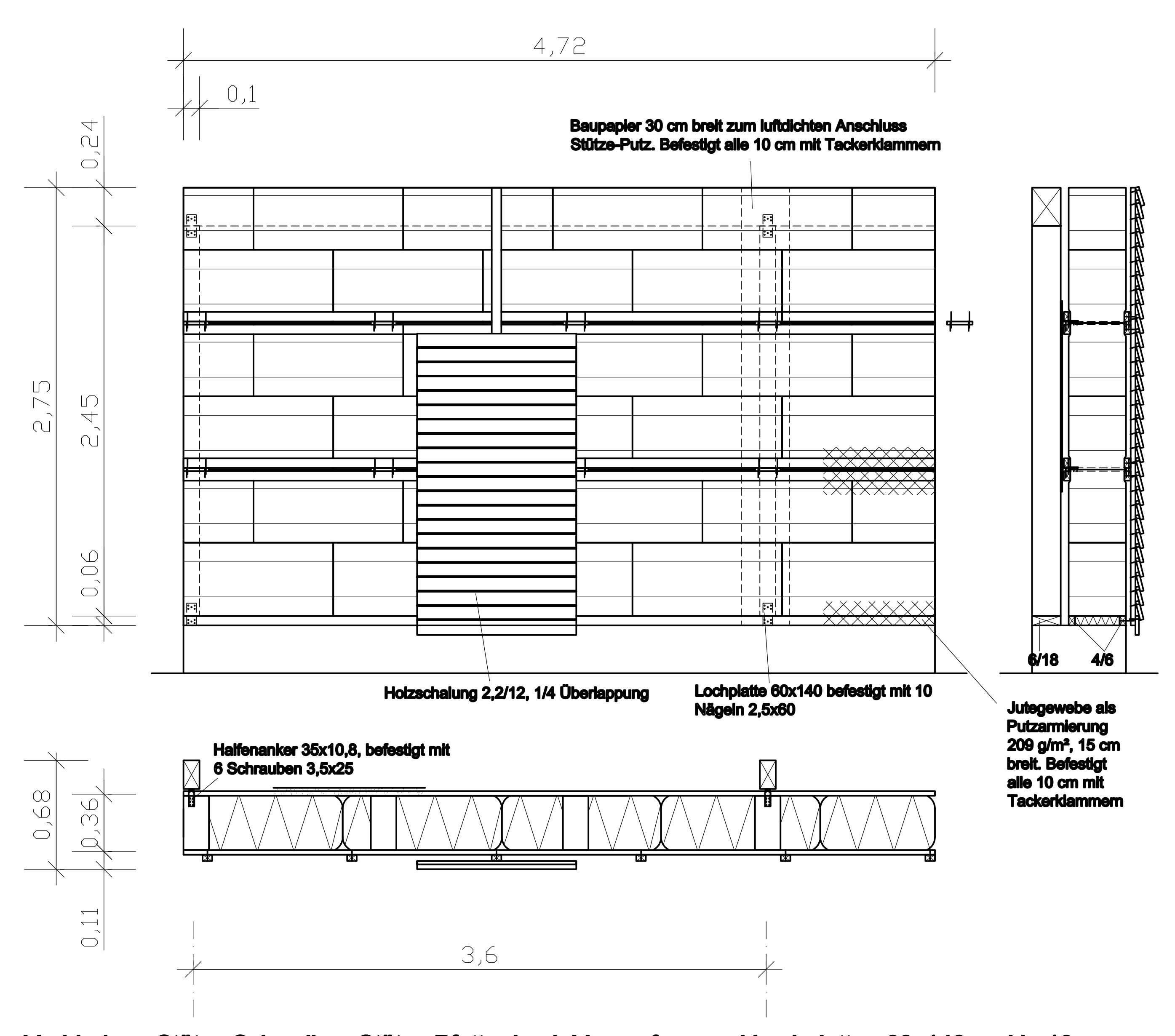
Verbindung Stütze Schwelle + Stütze Pfette durch Verzapfung und Lochplatten 60x140 und je 10 Nägeln. Pro Stütze 2 Lochplatten, 20 Nägel x 2,3 Stützen = 4,6 Lochplatten, 46 Nägel.
Pfette ballenbreit mit Holzweichfaserplatte überdämmt (2x0,18mx0,24mx4,72m=0,41 m³).
20 cm breiter Jutestreifen (200 g/m²) als Putzarmierung über den Anschluss Ballen-Holzweichfaserplatte und über den Stützen, 15 cm breiter Streifen über Übergang Ballen-Lagerholz (2x0,2x4,72+2,3x0,2x2,45+2x0,15x4,72= 4,5 m²), angeheftet mit Tackerklammern alle 10 cm (4x4,72mx10+2,3x2,45x10=260).
Raum zwischen Schwelle und äußeren Lagerhölzern aufgefüllt mit Perliten (2x0,14mx0,06mx4,72m=0,08 m³)
Innenseite 4 cm Lehmputz, mehrlagig aufgebracht, Außenseite 1 cm Lehmputz.
Lattung 4/6, 6 Latten über die Wand verteilt. Befestigt mit je drei Strohschrauben: 3 Schrauben x 6 Latten = 18 Schrauben und einer Schraube 6x80 pro Latte.
Stülbschalung 2,2/12, 1/4 Überlappung = 31 Bretter für 2,75 m. Befestigt mit einer Bauschraube 4,5x60 pro Brett und Ständer= 31x6=186 Schrauben.

1.3 Fugenorientiertes ballenbündiges Skelett (Putz–Schalung)



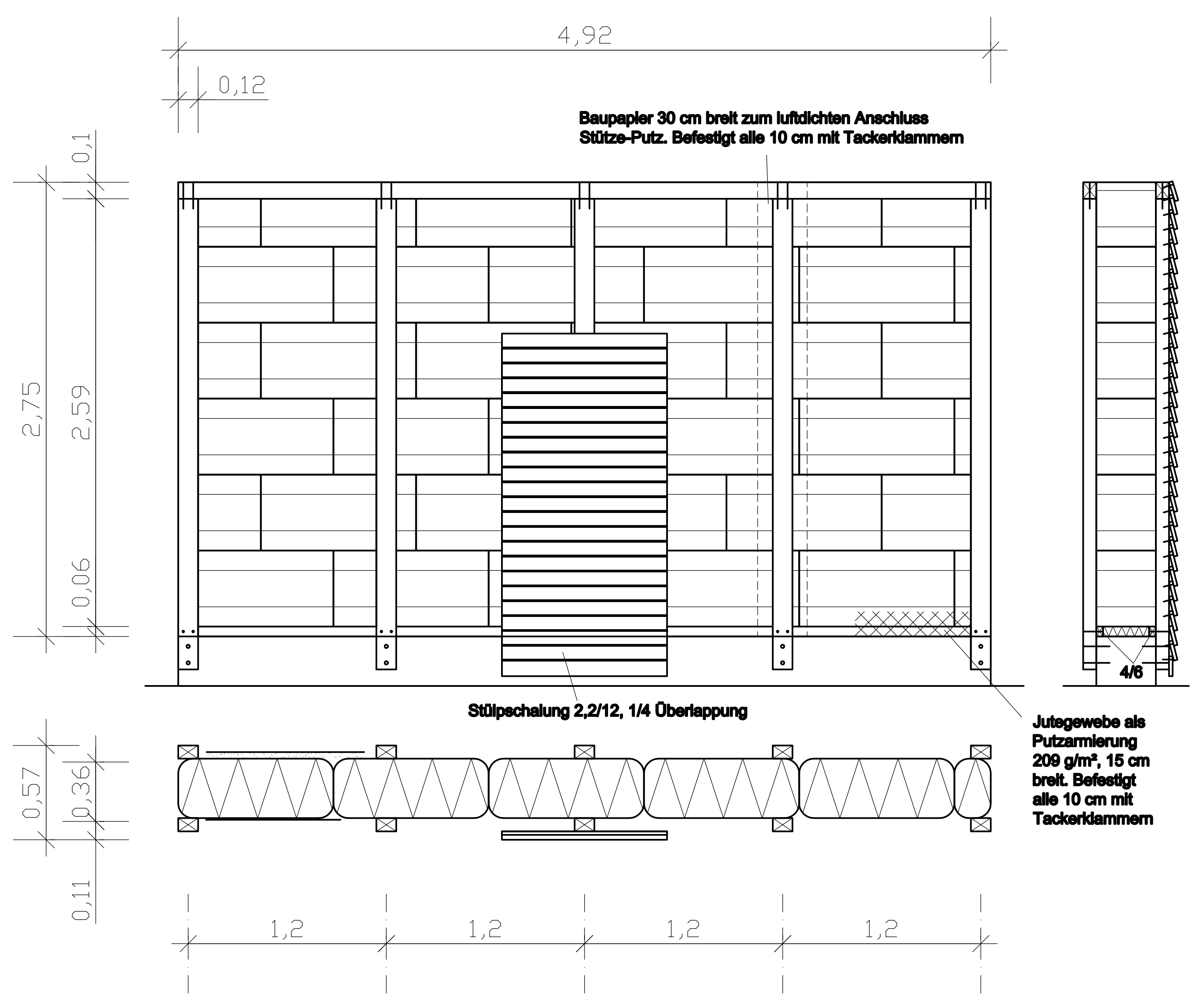
Verbindung Stütze-Schwelle mit Zapfen und Lochplatte 60x40 befestigt mit 10 Nägeln 2,5x60: Bei 5 Stützen 5 Lochplatten und 50 Nägel.
Raum zwischen den Lagerhölzern aufgefüllt mit Perliten (0,62mx0,06mx4,8m=0,18 m³).
15 cm breiter Streifen Jute über Übergang Ballen-Lagerholz, 20 cm breiter Streifen über Übergang Stütze-Ballen (0,15x4,8+0,2x2,69x5= 3,5 m²), angeheftet mit Tackerklammern alle 10 cm (190 Stück).
10 cm Baupapier auf der Wandseite der Pfette zum luftdichten Anschluss Putz-Holz: 0,1x4,8m=0,5 m². Befestigt mit Tackerklammern alle 10 cm: 50 Klammern.
Ballen über Verpackungsbänder und Kanthölzer 4/6 (auch zur Befestigung der Schalung) mit den Stützen verbunden: Pro Stütze 3 Verpackungsbänder á 2 m und 3 Klammern = 30 m Paketband und 15 Klammern. Verpackungsband durch Einfräsung und Holzdübel (2 x 8 cm) mit der Stütze verbunden = 1,2 m Dübel. Kanthölzer durch je 2 Dübel (2 x 50 cm pro Feld stabilisiert = 12 m Dübel)
Stülpschalung 2,2/12, 1/4 Überlappung = 31 Bretter. Befestigt mit einer Bauschraube 4,5x60 pro Brett und Ständer= 31x5=155 Schrauben.

1.4 Außenskelett (Putz-Schalung)



Verbindung Stütze Schwelle + Stütze Pfette durch Verzapfung und Lochplatten 60x140 und je 10 Nägeln. Pro Stütze 2 Lochplatten, 20 Nägel x 2,3 Stützen = 4,6 Lochplatten, 46 Nägel.
15 cm breiter Streifen über Übergang Ballen-Lagerholz (0,15x4,72= 1 m²), angeheftet mit Tackerklammern alle 10 cm (50 Stück).
30 cm Baupapier auf der Wandseite der Stützen 15 cm auf der Pfette zum luftdichten Anschluss Putz-Holz: 0,3x2,45x2,3+0,15x4,72=2,5 m². Befestigt mit Tackerklammern alle 10 cm: 2,45x2,3x10+4,72x10=105 Klammern.
Raum zwischen den Lagerhölzern aufgefüllt mit Perliten (0,28mx0,06mx4,72m=0,08 m³).
Nach jeder 2. Ballenlage Leiterrahmen eingelegt, bestehend aus: 4x Dachlatte 3/5, 4,72 m lang, 4,5 Sperrholzsprossen, 0,02x0,16x0,4 m, Verbindung Dachlatte-Sprosse: je Sprosse 4 Schrauben 6x80 und 4 Schrauben 6x100 = je 18 Schrauben 6x80 und 6x100.
Befestigung Leiter-Stütze durch Halfen und Halfenanker. Pro Stütze 1 Halfe 1,2 m, 2 Halfenanker.
Verbindung Halfenanker-Leiter mit je 6 Schrauben 3,5x20, Summe: 27 Schrauben.
Innenseite 4 cm Lehmputz, mehrlagig aufgebracht, Außenseite 1 cm Lehmputz.
Lattung 3/5, 6 Latten über die Wand verteilt. Befestigt mit je 5 Schrauben an den Leiterrahmen und am Lagerholz: 5 Schrauben x 6 Latten = 30 Schrauben 4,5x60.
Stülbschalung 2,2/12, 1/4 Überlappung = 31 Bretter für 2,75 m. Befestigt mit einer Bauschraube 4,5x60 pro Brett und Ständer= 31x6=186 Schrauben.

1.5 Doppelskelett (Putz–Schalung)



Verbindung Stütze Fundament mit Schwerlastankern (nicht mitberechnet). Verbindung Stütze Lagerholz mit je 2 Schrauben 6x120: 10 Stützen x 2 Schrauben= 20 Schrauben. Verbindung Stütze Pfette: je 2 Nägel 5,5x160 = 10 Nägel.

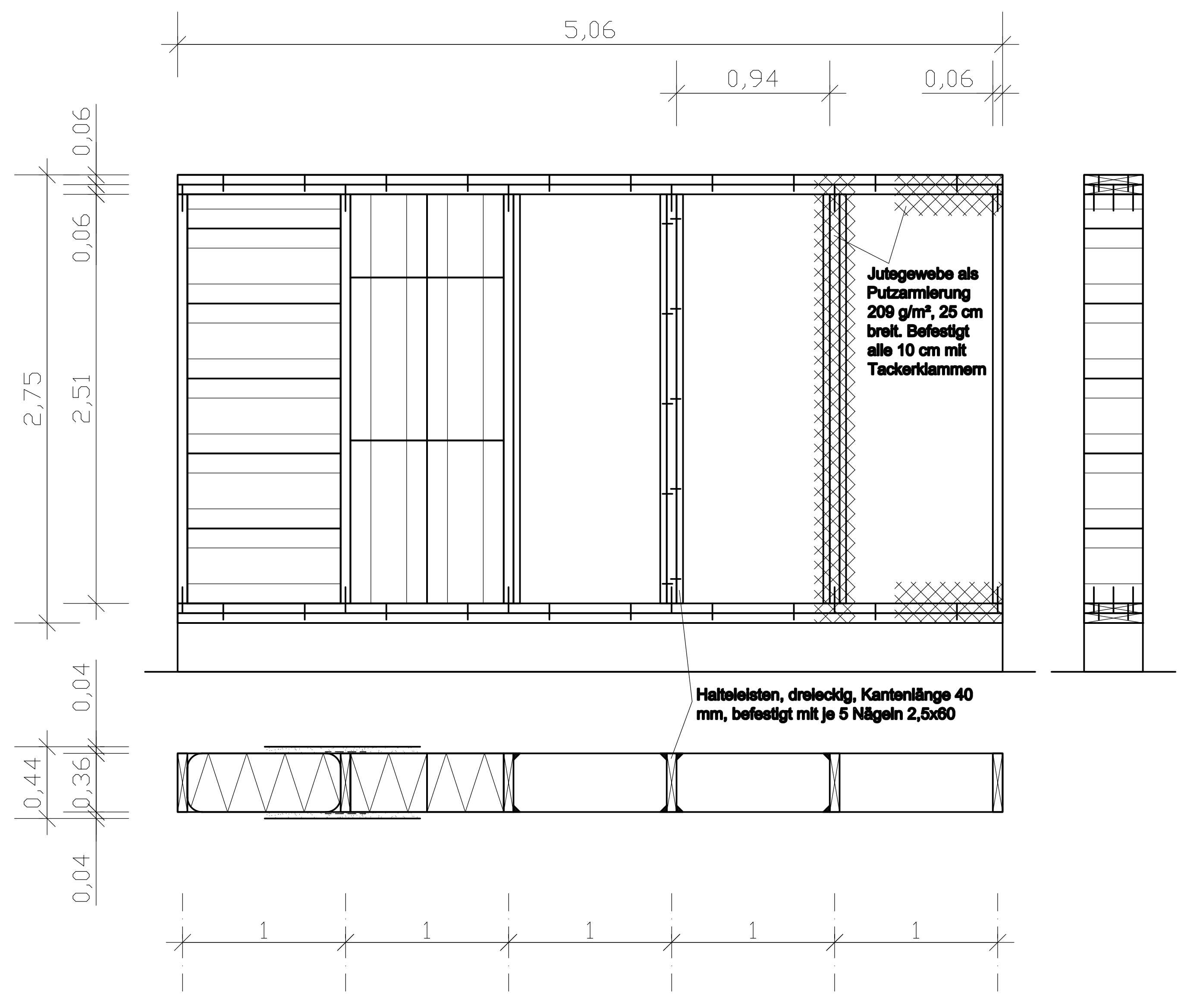
Raum zwischen den Lagerhölzern aufgefüllt mit Perliten (0,28mx0,06mx4,92m=0,08 m³).

15 cm breiter Streifen Jute über Übergang Ballen-Lagerholz (0,15x4,92= 1 m²), angeheftet mit Tackerklammern alle 10 cm (50 Stück).

30 cm Baupapier auf der Wandseite der Innenstützen, 15 cm auf der Pfette zum luftdichten Anschluss Putz-Holz: 0,3x2,59x5+0,15x4,92=4,7 m². Befestigt mit Tackerklammern alle 10 cm: 2,59x5x10+4,92x10=180 Klammern.

Stülpschalung 2,2/12, 1/4 Überlappung = 35 Bretter. Befestigt mit einer Bauschraube 4,5x60 pro Brett und Ständer= 33x5=165 Schrauben.

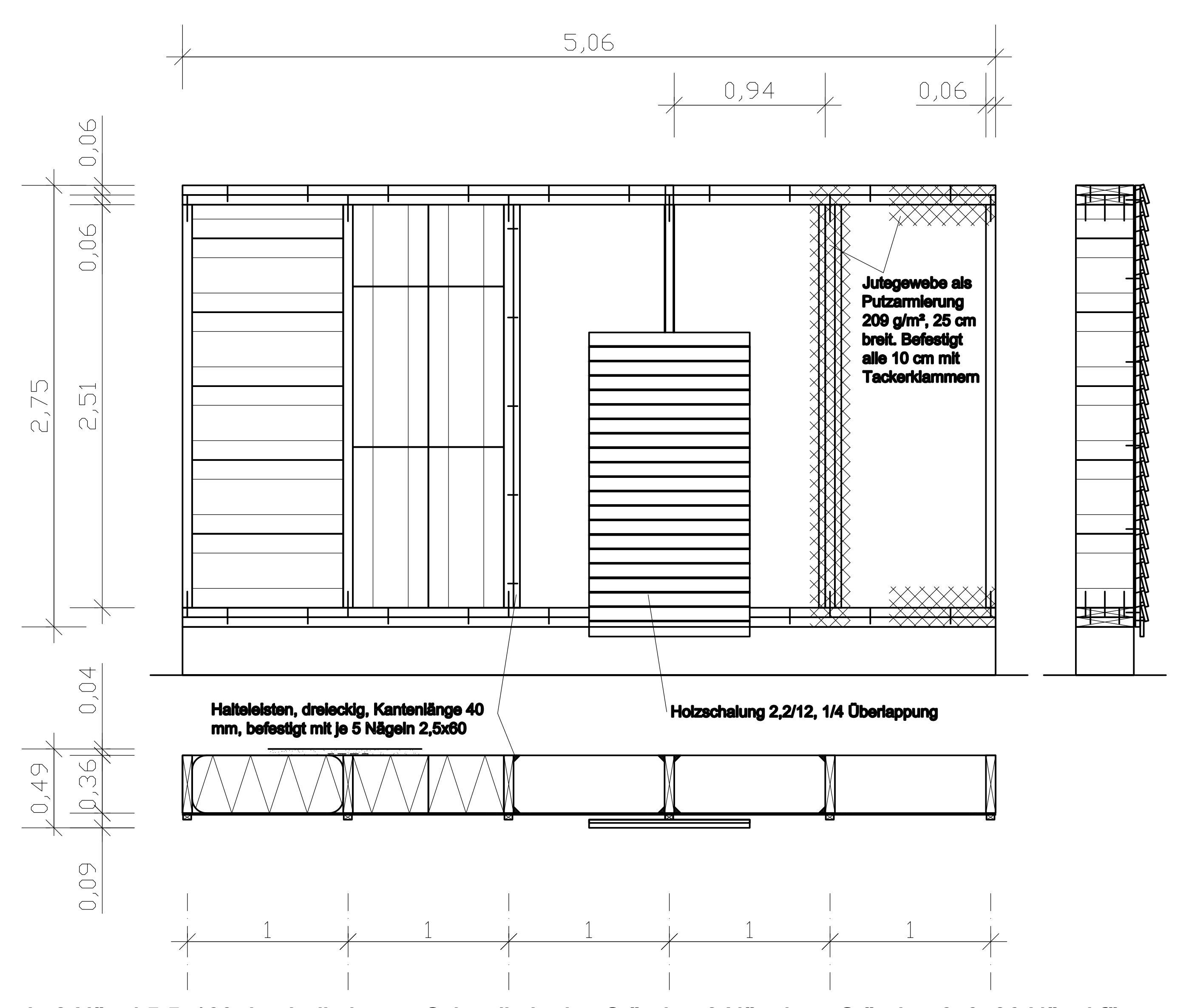
2 Rahmensystem (Putz–Putz)



Je 3 Nägel 5,5x160 durch die innere Schwelle in den Ständer: 6 Nägel pro Ständer, 6x6=36 Nägel für die Wand.
Je 4 Nägel 3,8x100 pro Feld zur Verbindung des Rahmens mit den äußeren Schwellen: 8 Nägel pro Feld, 8x5=40 Nägel für die Konstruktion.
Je 5 Nägel 2,5x60 zur Befestigung der Halteleisten, je Leiste: 5 Nägel x 20 Leisten =100 Nägel.
25 cm breiter Jutestreifen als Putzträger pro Ständer: 12 Streifen, 25 cm breit, 2,75 m lang + 4 25 cm Streifen über die Schwellen, 5,06 m lang = 13,31 m²
Jutegewebe angetackert mit 1 Klammer alle 10 cm: 12 Ständerseiten à 2,75 m + 4 Rahmenseiten à 5,06 m = 535 Klammern.
Beidseitig 4 cm Lehmputz, mehrlagig aufgebracht.

Dimensionierung entsprechend Kolb 1998: 79ff

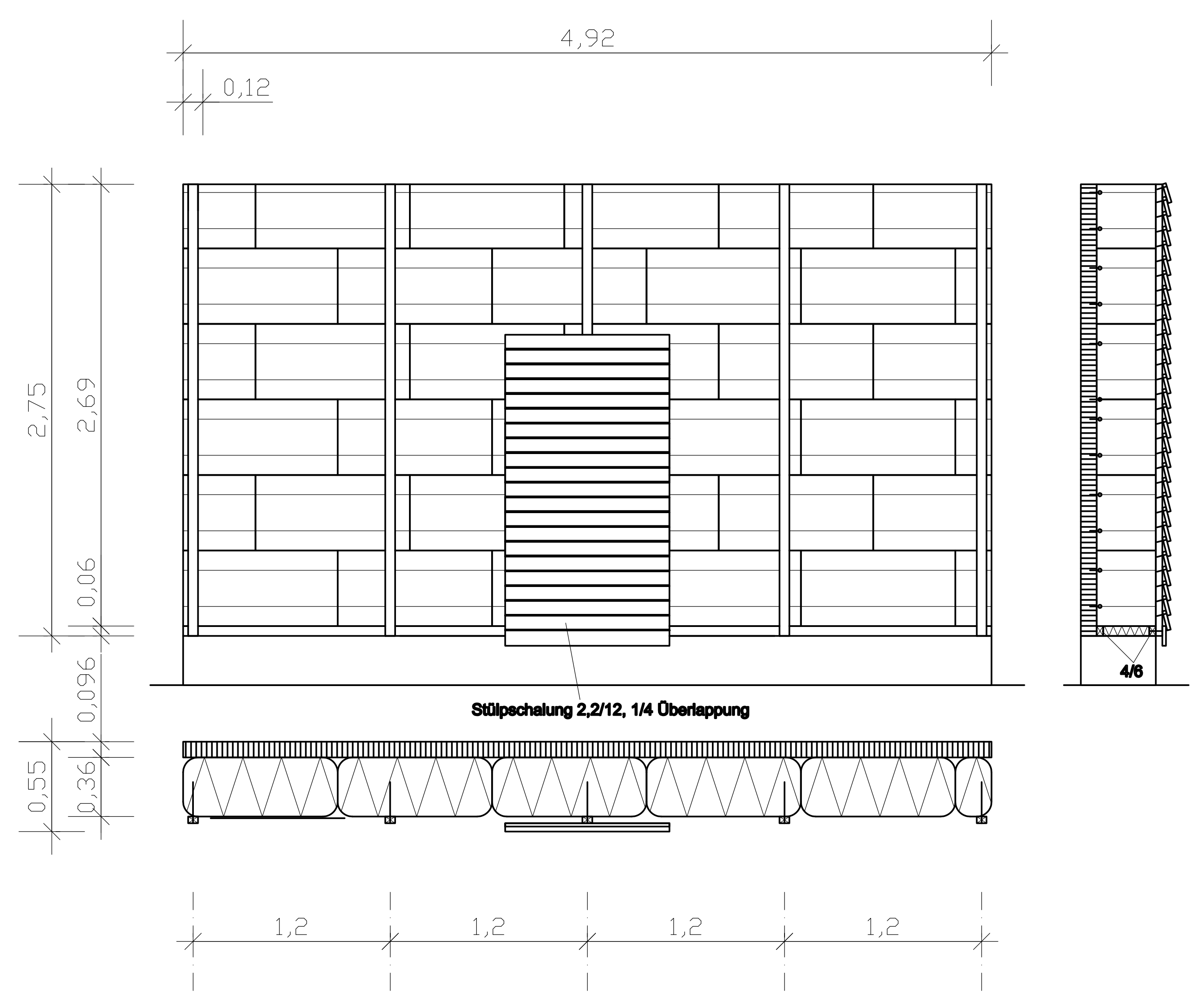
2a Rahmensystem (Putz–Schalung)



Je 3 Nägel 5,5x160 durch die innere Schwelle in den Ständer: 6 Nägel pro Ständer, 6x6=36 Nägel für die Wand.
Je 4 Nägel 3,8x100 pro Feld zur Verbindung des Rahmens mit den äußeren Schwellen: 8 Nägel pro Feld, 8x5=40 Nägel für die Konstruktion.
Je 5 Nägel 2,5x60 zur Befestigung der Halteleisten je Leiste: 5 Nägel x 20 Leisten =100 Nägel.
25 cm breiter Jutestreifen als Putzträger pro Ständer: 12 Streifen, 25 cm breit, 2,75 m lang + 4 25 cm Streifen über die Schwellen, 5,06 m lang = 13,31 m²
Jutegewebe angetackert mit 1 Klammer alle 10 cm: 12 Ständerseiten à 2,75 m + 4 Rahmenseiten à 5,06 m = 535 Klammern.
Innenseite 4 cm Lehmputz, mehrlagig aufgebracht, Außenseite 1 cm Lehmputz.
Lattung 3/5, je eine pro Ständer. Befestigt mit 6x80 Bauschrauben alle 52 cm= 6 Schrauben pro Ständer x 6 Ständer = 36 Schrauben.
Stülbschalung 2,2/12, 1/4 Überlappung = 31 Bretter für 2,75 m. Befestigt mit 4,5x60 Maschinenschrauben pro Brett und Ständer= 31x6=186 Schrauben

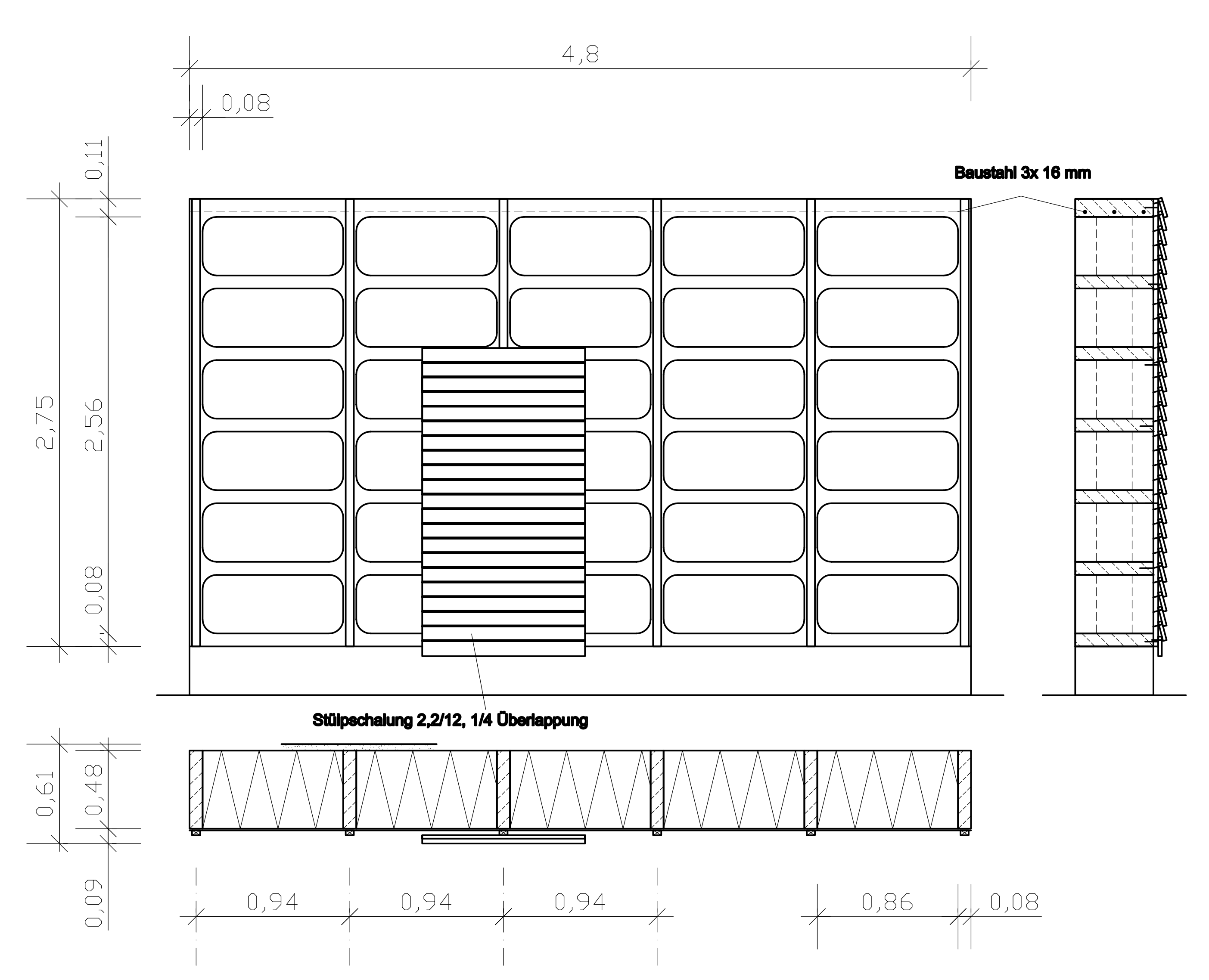
Dimensionierung entsprechend Kolb 1998: 79ff

3 Scheibentragwerk (Scheibe–Schalung)



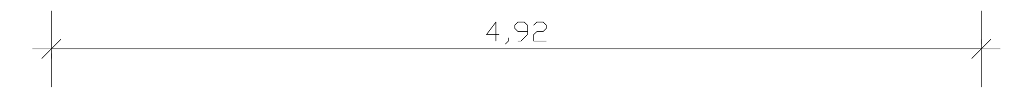
Verbindung KLH-Ballen mittels Schraubösen und Ballengarn. Pro Ballenstoß und -ende zwei Ösen: 6 Ballenlagen x 7 Stöße/Enden x 2 Ösen= 84 Ösen. Ballengarn: 1,4 m pro Stoß bzw. Ballenende+ 1 Wandlänge= 14,72 m pro Ballenlage x 6 Ballenlagen =90 m Garn.
Raum zwischen den Lagerhölzern aufgefüllt mit Perliten (0,28mx0,06mx4,92m=0,08 m³).
Lattung 3/5 5 Latten à 2,75 m, befestigt mit 3 Strohschrauben und 1 Schraube 6x80 pro Latte = 15 Strohschrauben und 5 Schrauben 6x80.
Stülpschalung 2,2/12, 1/4 Überlappung = 31 Bretter. Befestigt mit einer Schraube 4,5x60 pro Brett und Latte: 31x5=155 Schrauben.

4 System Gagné (Putz–Schalung)



Zwischen den Stoß- und Lagerfugen sowie an den Seiten und zum Fundament 8 cm starke Mörtelfugen. Oberste Mörtellage 11 cm, mit 3 wandlangen 16 mm Eisen armiert.
Innenseite 4 cm Lehmputz, mehrlagig aufgebracht, Außenseite 1 cm Lehmputz.
Lattung 3/5, 6 Latten über die Wand verteilt, befestigt mit je 5 Schrauben 6x80 und Dübeln S8: 5 Schrauben x 6 Latten = 30 Schrauben.
Stülpschalung 2,2/12, 1/4 Überlappung = 31 Bretter für 2,75 m. Befestigt mit einer Bauschraube 4,5x60 pro Brett und Ständer= 31x6=186 Schrauben.

5a Offenes System nach US–Buildingcodes (Putz–Schalung)

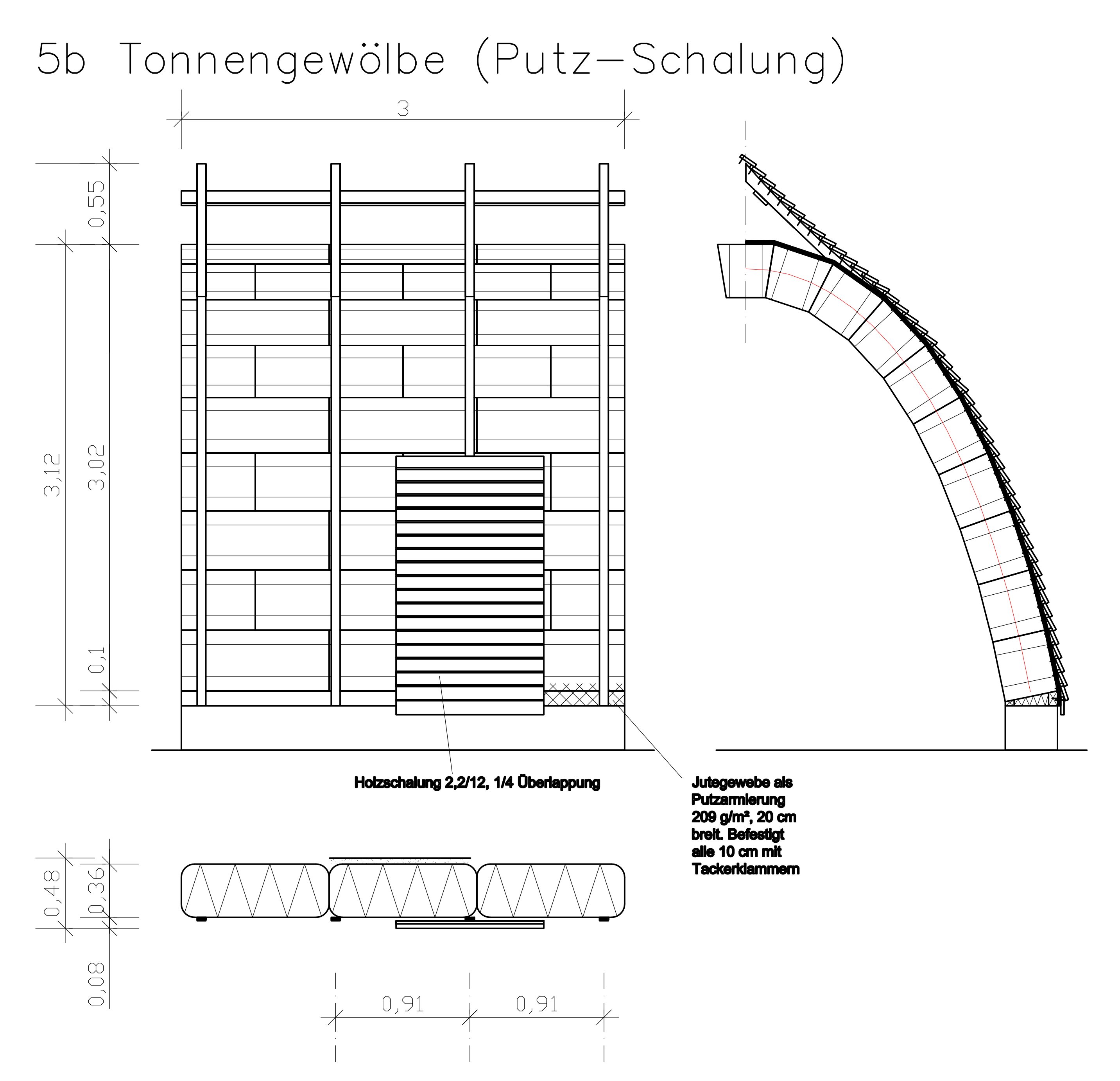


Stülpschalung 2,2/12, 1/4 Überlappung

Ballen auf 2 Lagerhölzern 4/6.
Raum zwischen den Lagerhölzern aufgefüllt mit Perliten (0,4mx0,06mx4,92m=0,10 m³).
Verbindung Fundament-lasttragende Wand mit 6 0,56 m langen 14 mm Armierungseisen.
Verbindung Fundament-Ringanker mit 3 Gewindestangen M14, 3 m lang.
Verbindung der Ballen untereinander über 40 angespitzte Ballennägel 3/3 aus Holz.
Leiterkonstruktion Ringanker: beidseitig der Wand je zwei Kanthölzer 6/14, verbunden mit 5 Kanthölzern 6/14. Kanthölzer untereinander verbunden mit insgesamt 64 Nägel 3,8x100.
Innen 4 cm Lehmputz, mehrlagig aufgebracht, außen 1 cm Lehmputz.
Putzarmierung innen mit Jutegewebe, 200 g/m² 20 cm über Ringanker, 15 cm über Lagerholz: 0,35x4,92 m=1,8 m². Befestigt mit einer Tackerklammer pro 10 cm: 100 Klammern
Lattung 4/6 5 Latten á 2,66 m, befestigt mit 2 Strohschrauben und 2 Schraube 6x80 pro Latte = 10 Strohschrauben und 10 Schrauben 6x80.
Stülpschalung 2,2/12, 1/4 Überlappung = 30 Bretter. Befestigt mit einer Schraube 4,5x60 pro Brett und Latte: 30x5=150 Schrauben.

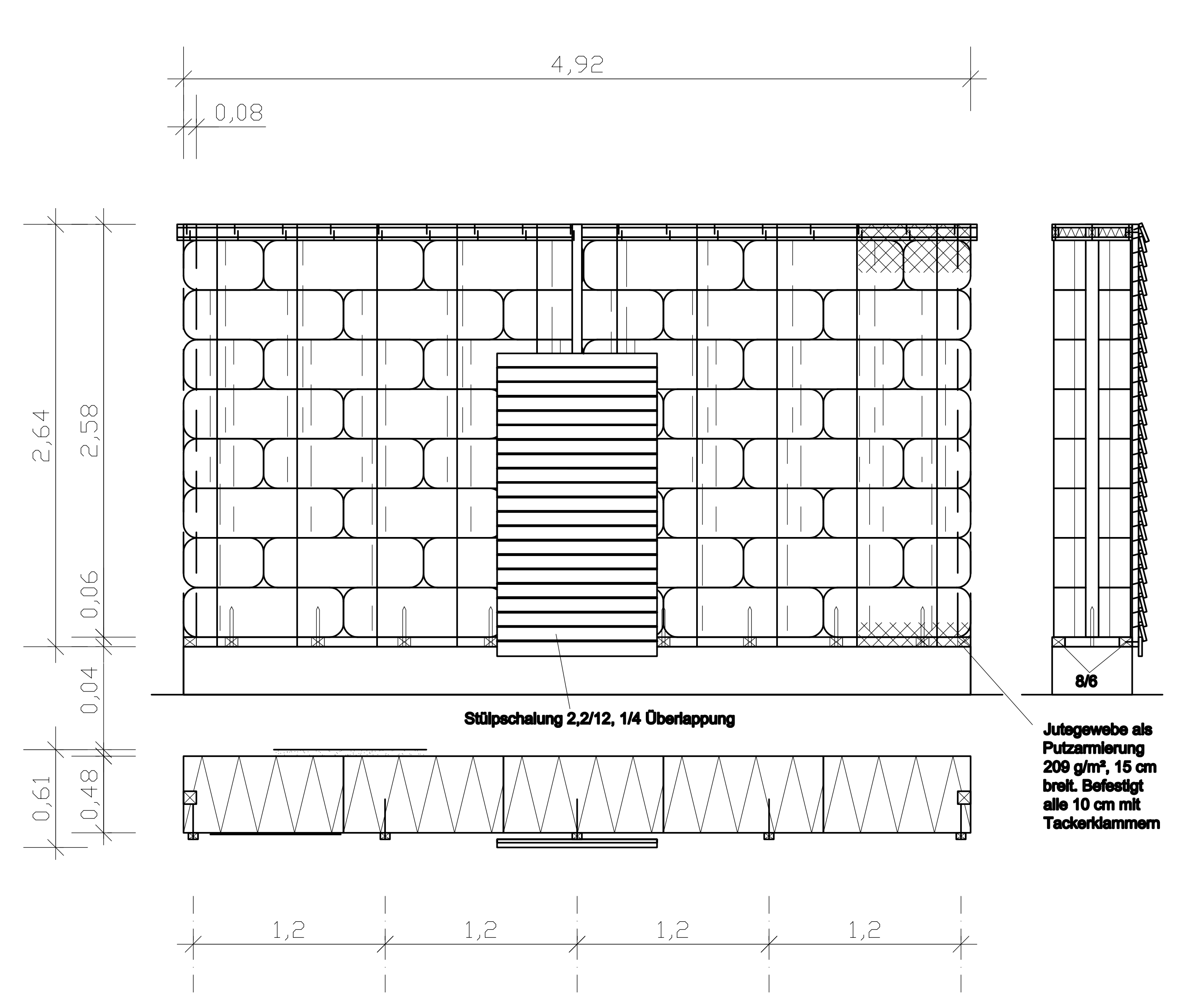
Konstruktion laut California Straw Bale Code

5b Tonnengewölbe (Putz-Schalung)



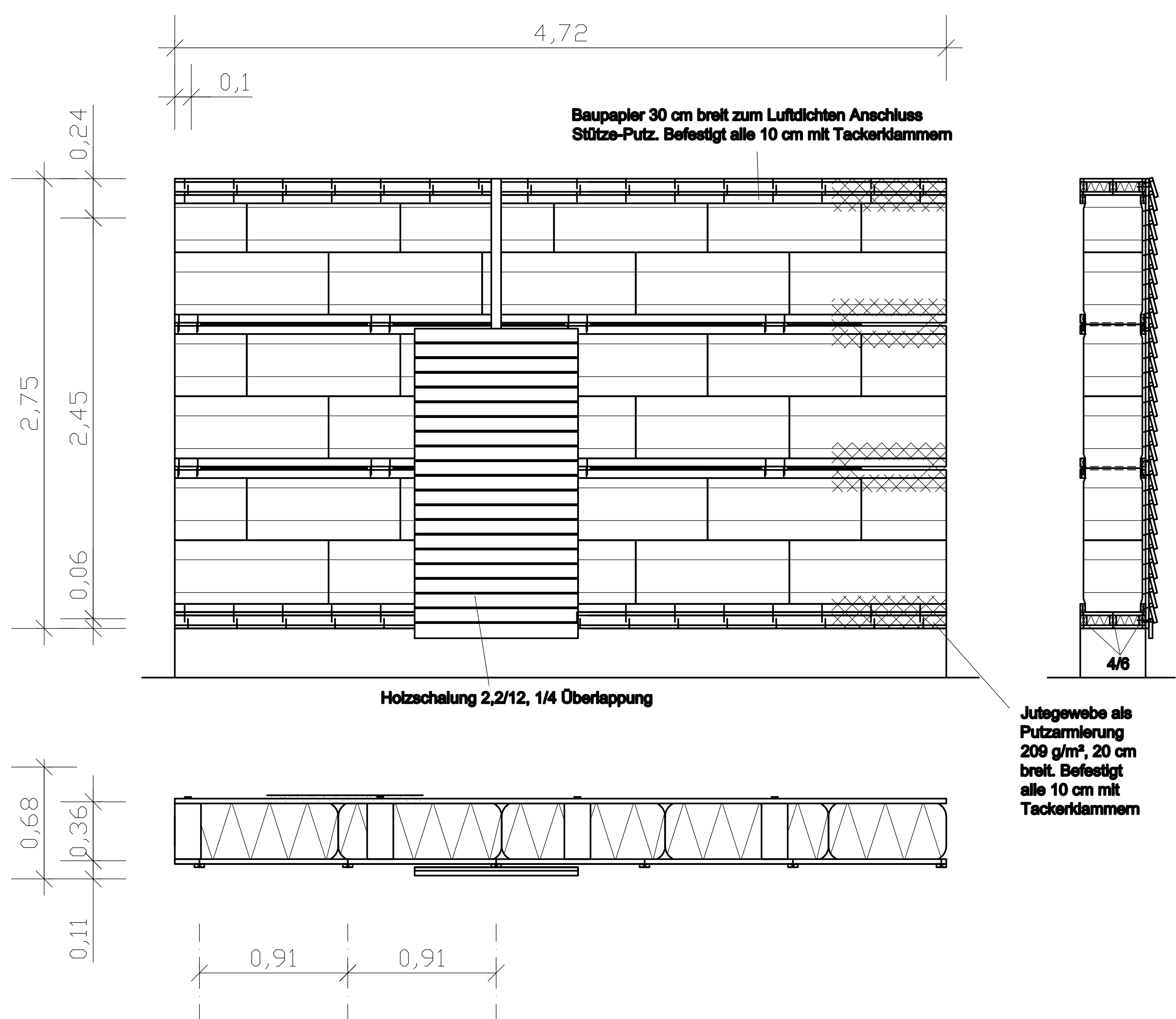
Lagerholz innen: 4/6, Lagerholz außen 6/10. Zwischenraum aufgefüllt mit Perliten ((0,04x0,23+(0,23x0,05)/2)x3x2=0,09m³).
Strohballen 1 m lang, jeder 2x auf Gehrung geschnitten, 3 pro Lage, 19 Lagen: 57 Strohballen.
Ballen mit 3 Lagen 8 mm Sperrholzstreifen, 6 cm breit. Gewölbe wird mit Verpackungsbändern gespannt, die über den Sperrholzstreifen laufen. Achsabstand der Streifen: 0,91 m: Insgesamt 35 m Verpackungsband, 4 Verpackungsbandklemmen, 102 m Sperrholzstreifen.
Innen: 10 cm breiter Streifen Jute über Übergang Ballen-Lagerholz (0,6 m²), angeheftet mit Tackerklammern alle 10 cm (60 Stück).
Innenputz: Lehm, 4 cm, Außenputz 1 cm.
Stülpschalung auf Sperrholzstreifen, im oberen Bereich auf Aufschieblinge aus Kantholz 4/8, insges. 10,5 m. Aufschieblinge (ausgesteift mit 2 Brettern 0,22/15 Aufgeschraubt (4,5x50)), befestigt mit je drei Schrauben 6x80 und 4,5x50: 24 Schrauben je Sorte.
Stülbschalung 2,2/12, 1/4 Überlappung = 94 Bretter für das gesamte Gewölbe. Befestigt mit einer Schraube 4,5x50 pro Brett und Ständer Sperrholzstreifen: 376 Schrauben
Fläche (Ballenaußenseite) 25 m²

6.1 System Stroh unlimited (Putz–Schalung)



Ballen auf Leiterrahmen aus 6/8 Kanthölzern mit 11 Sprossen. Mittelsprossen befestigt mit je 2 Endsprossen mit je 4 6x16 Schrauben: 26 Schrauben.
Raum zwischen den Lagerhölzern aufgefüllt mit Perliten ((4,92-11*0,08)*0,34*0,06m=0,082 m³).
An jeder Wandseite ein 8/8 Kantholz in den Ballen eingelassen. Verbindung Leiterrahmen Kantholz: je 2 Stahlwinkel befestigt mit je 8 Schrauben 4,5x60: 4 Stahlwinkel, 32 Schrauben.
Verbindung Leiterrahmen-lasttragende Wand mit 9 0,25 m langen 20 mm Rundhölzern.
Verbindung Leiterrahmen-Ringanker mit 10 16 mm Verpackungsbändern à 6,5 m, verbunden mit je einer Verpackungsbandklemme.
Verbindung der Ballen untereinander über 40 angespitzte Ballennägel 3/3 aus Holz.
Konstruktion Ringanker: Beidseitig und der Wand und in der Wandmitte ein Kanthölzer 4/6, verbunden über je eine Sperrholzplatte über die gesamte Wandbreite. Verbindung mit 4,5/60 Schrauben alle 30 cm: 68 Schrauben.
Innen 4 cm Lehmputz, mehrlagig aufgebracht, außen 1 cm Lehmputz.
Putzarmierung innen mit Jutegewebe, 200 g/m² 20 cm über Ringanker, 15 cm über Lagerholz: 0,35x4,92 m=1,8 m². Befestigt mit einer Tackerklammer pro 10 cm: 100 Klammern
Lattung 4/6 5 Latten à 2,64 m, befestigt mit 2 Strohschrauben und 2 Schrauben 6x80 pro Latte = 10 Strohschrauben und 10 Schrauben 6x80.
Stülpschalung 2,2/12, 1/4 Überlappung = 30 Bretter. Befestigt mit einer Schraube 4,5x60 pro Brett und Latte: 30x5=150 Schrauben.

6.2 System E+ (Putz-Schalung)



Untere Lasteinleitungsplatte aus 3 mal Kantholz 5/6, verbunden über Sperrholzplatten, 2/52 oben und unten, geschraubt alle 30 cm mit 4,5x60: 14,16 m Kantholz, 4,9 m² Sperrholzplatte, 95 Schrauben.
Zwischenräume gedämmt mit 0,1 m³ Holzweichfaserplatte. Seitlich zur Halterung der Ballen je ein Kantholz 3/5 geschraubt alle 30 cm mit 4,5x60: 9,44 m Kantholz, 32 Schrauben.
Obere Lasteinleitungsplatte gleiche Konstruktion.
Nach jeder 2. Ballenlage wird ein Leiterrahmen eingelegt, bestehend aus: 4x Dachlatte 3/5, 4,72 m lang, 4,5 Sperrholzsprossen, 0,02x0,16x0,4 m, Verbindung Dachlatte-Sprosse: je Sprosse 4 Schrauben 6x80 und 4 Schrauben 6x100 = je 18 Schrauben 6x80 und 6x100.
Verbindung der Lasteinleitungsplatten und Leiterrahmen über Spannelemente:
Außen: 6 Sperrholzstreifen 2,75 m lang, 10 cm breit, 2 cm dick. Befestigung mit 3 4,5/60 Schrauben je Streifen und Lasteinleitungsplatte/Leiterrahmen: 72 Schrauben.
Innen: 4,5 Windrispenbänder 2,75 m lang, 2x40. Befestigung mit je 5 Schrauben 3,5/30 je Windrispenband und Lasteinleitungsplatte/Leiterrahmen: 12,375 m Windrispenband, 90 Schrauben.
Innen: 20 cm breiter Streifen Jute über Übergang Ballen-Kasteinleitungsplatte, 25 cm breiter Streifen über Übergang Leiterrahmen-Ballen (2x(0,20x4,72+0,25*4,72))= 4,25 m²), angeheftet mit Tackerklammern alle 10 cm (190 Stück).
Innenseite 4 cm Lehmputz, mehrlagig aufgebracht, Außenseite 1 cm Lehmputz.
Stülbschalung 2,2/12, 1/4 Überlappung = 31 Bretter für 2,75 m. Befestigt mit einer Bauschraube 4,5x50 pro Brett und Ständer= 31x6=186 Schrauben.

Anhang III.3: US-Amerikanische Straw Bale Building Codes

Dieser Anhang stellt die Inhalte folgender US-Amerikanischer Straw Bale Building Codes tabellarisch vergleichend dar: Tucso/Pima County (Mayor and City Council of Tucso 1996), City of Cortez Straw Bale Code (City of Cortez 1994), City of Boulder Straw Bale Code (City of Boulder 1981), California Straw Bale Code (Sher, Richter, Woods, Johannessen 1995), Austin Straw-Bale Code (City of Austin).

	Tucso/Pime	Cortez	Boulder	Califrornia	Austin
Erscheinen/ Inkrafttreten	02.01.1996	27.09.1994	1981	16.10.1996	
Geltungsbereich	Alle Strohballenkons-truktionen. Gebäude in lasttragender Bauweise: Einfamilienhäuser, Neben-gebäude.	Alle Strohballenkons-truktionen, eingeschlossen Sichtschutz- und Garten-mauern. Gebäude in Last-tragender Bauweise Ein- und Zweifamilienhäuser, Nebengebäude.	Wie Ticson/Pime SBC, zusätzlich: Max. 1Geschoss hoch, Dachspannweite nicht mehr als 9,75 m zwischen den tragenden Wänden	keine Angaben	Wie Cortez SBC
Strohart	Alle, solange die im Code genannten Mindestanforderungen erfüllt werden können				
Feuer	genauso restistent oder besser als vergleichbare Holzrahmenkonstruktionen				
Bindung	Draht od. Polyprobylengarn				
Min. Ballendichte (lasttragend)	112 kg/m³ TM (Stichproben: 5 beliebige Ballen pro Baustelle)				
Max. Feuchtigkeit	20% (stichproben: 5 beliebeige Ballen pro Baustelle)				
Min. Wanddicke	0,356 m			0,33 m	0,356 m
Max. Wandhöhe (lasttragend)	max 1 Stockwerk, max h:d 5,6:1				
Max. unausgesteifte **Wandlänge** (lasttr.)	max l:d 13:1			max l:d 15,7:1	
Max. zulässige Spannung	17,06 kN/m² auf Wandoberkante, Lasteintrag in die Wandmitte		18,95 kN/m² auf Wandoberkante, Lasteintrag in die Wandmitte		
Fundamente	So breit wie die Ballen, min. 0,305 m ins Erdreich, min. 0,152 m über Erdreich	Wie Tucson/Pime County SBC, jedoch min. 0,812 m ins Erdreich	So bereit wie die Ballen, min. 0,203 m über Erdreich	Wie Tucson/Pime SBC, jedoch min. 0,305 m, min. bis zur Frosttiefe ins Erdreich	Wie Boulder SBC
Verbindung Fundament/Ballen	Stäbe min. 12,7 mm dick, min. 0,152 m ins Fundament, min. 0,305 m darüber. Platzierung in der Wandmitte, max 0,609 m Abstand. Zu Öffnungen und Ecken max. 0,305 m Abstand			Wie Tucson/Pime SBC jedoch 0,178 m im Fundament verankert	Wie Tucson/Pime SBC jedoch "sicher" im Fundament verankert (ohne Maßangabe)

<table>
<tr><th></th><th>Tucson/Pime</th><th>Cortez</th><th>Boulder</th><th>Califrornia</th><th>Austin</th></tr>
<tr><td>Verbindung Strohballenwand/ Nichtstrohballenwand</td><td colspan="5">Methode 1: Holzdübel min. 15,8 mm dick, werden durch Löcher im anderen Wandmaterial min. 0,305 m in den Ballen geschlagen, min. ein Dübel pro Ballen. Methode 2: Holzpflöcke min. 0,305 m lang, an ihrem dicken Ende min. 38,1 mm x 88,9 mm dick als Ankerpunkte komplett in den Ballen geschlagen. Methode 3: Schraub- oder Gewindestangenverbindung mit der anderen Wand durch die Strohballenwand mit Widerlagern aus Stahl oder Sperrholz an min. 3 Punkten der Wand.</td></tr>
<tr><td>Verankerung d. Ringankers im Fundament (lasttragend)</td><td colspan="2">Mit Stahlanker, min. Durchmesser 12,7 mm, min. 0,178 m im Fundament, max. Abstand 1,828 m, min 2 Anker pro Wand. Max. Entfernung zum Wandende: 0,914 m. Anker und Ringbalken werden mit 12,7 mm Gewindestangen mit dem Fundament verbunden. Die Verbindung zwischen Fundament und Ringbalken soll das Abheben des Faches verhindern und Setzungen, die sich aus den "Dead Loads" ergeben, durch Nieder-spannen vorweg nehmen. Auch andere Methoden, die das gleiche Ergebnis garantieren, sind gestattet. Für Abstand und Anzahl der Ankerpunkte gilt dann das gleiche wie für die beschriebene Methode.</td><td>Wie Tucson/Pime SBC, jedoch Ankerabstand zum Wandende max. 0,609 m, zwischen den Ankern 1,219 m</td><td colspan="2">Min 2 Ankerpunkte pro Wand, max. 1,828 m Abstand zwischen den Ankern, max. 0,914 m zu den Enden der Wand. Verankerung durch: Methode 1: 12,7 mm Stahlanker, die min. 0,178 m in das Fundament eingelassen sind. Verlängerung mit Gewindestangen duch den Ringbalken. Dort erneute Verankerung. Methode 2: Äquivalente Verankerung des Ringbalkens mit Drähten im Fundament.</td></tr>
<tr><td>Schutz vor aufsteigen-der Feuchte</td><td colspan="5">Zwischen Ok Fundament und 1. Ballenlage eine Wassersperre aus entweder 1. Wasserdichtem zementösem Überzug, 2. Bitumenschicht auf Haftgrund, 3. Metalleinlage, an den Ankerpunkten versiegelt, 4. andere erprobte Abdichtungen</td></tr>
<tr><td>Öffnungen</td><td colspan="3">Mindestens einen volle Ballen von der nächsten Außenecke entfernt. Min. einen vollen Ballen Abstand zur Außenwand. Max. 50% der Wandlänge bezogen auf das Wandinnenmaß dürfen Öffnungen sein. Lastabtrag/Verteilung über der Öffnung durch tragende Rahmen oder Stürze, doppelt so lang wie das Fenster breit ist. Diese müssen min. 0,609 m auf beiden Seiten in die Ballen eingreifen. Durch die zusätzliche Last darf die Spannung im Auflagebereich 125% des maximal zulässigen Wertes nicht übersteigen.</td><td>Wie Tucson/Pime SBC, jedoch ohne Überschreitung der max. zulässigen Spannung im Auflagebereich</td><td>Wie Tucson/Pime SBC, jedoch ohne Überschrei-tung der max. zulässigen Spannung im Auflagerbe-reich und ohne nähere Erläuterungen des Lastab-trags aus Stürzen</td></tr>
<tr><td>Aufschichten</td><td colspan="4">Im Verbund, min. 0,305 m Überlappung, Lücken zwischen den Ballen von max. 0,152 m erlaubt (werden mit losem Stroh ausgestopft), in lasttragenden Gebäuden nur liegende Ballen, in nichtlasttragenden auch stehende. In lasttragenden Gebäuden immer ganze Ballen an den Ecken.</td><td>Wie Tucson/Pime SBC jedoch 0,33 m Über-lappung im Verbund</td></tr>
<tr><td>Ballennägel/ Klammern (lasttragend)</td><td colspan="4">Methode 1: Nach den ersten 4 Ballenlagen Ballennägel (pro Ballen min. 2) in die oberste Lage schlagen. In jede weitere Lage Ballennägel (2 pro Ballen) einbringen, die bis in die 3. Ballenlage unter der neuen reichen. Bei 7 oder 8 Ballenlagen muss die 5. Lage nicht genagelt werden. Methode 2: Wie Methode 1, jedoch die ersten Ballennägel in die 3. Lage. Die Nägel in allen weiteren Lagen müssen durch 2 Ballenlagen unter der aktuellen Lage reichen. Generell: Max. Entfernung der Ballennägel zum Ballenenden: 0,152 m, maximale Entfernung zu Ecken oder Öffnungen 0,305 m. U-förmige Klammern, 0,457 m lang mit 0,152 m langen Beinen halten die Ballen über Eck zusammen.</td><td>2 Ballennägel pro Ballen über 0,457 m, 1 Ballennagel pro Ballen, Ballenlänge zwischen 0,305 und 0,457 m. Die Nägel müssen min. 0,203 m in die nächstuntere Ballenlage reichen. Sonst wie Tucson/Pime SBC</td></tr>
</table>

	Tucson/Pime	Cortez	Boulder	Califrornia	Austin
Ringanker	Je 2 5,1/15,2 cm Kanthölzer (verbunden mit Nägeln 40 cm), eins an der Innen- das andere an der Außenkante der SB Wand. Verbunden über je 4 Nägel mit 5,1/15,2 cm Kanthölzern mit einem max Rasterabstand von 1,828 m, verbunden über Gewindestangen mit dem Fundament. Eckverbindungen müssen Überlappungen oder Verstärkungen durch Sperrholz- oder Metallplatten aufweisen. Alternative Konstruktionen müssen die gleiche Performance aufweisen	Wie Tucson/Pime SBC, jedoch ohne Angabe eines Rasterabstandes und mit dem Zusatz, dass eine gleichmäßige Lastverteilung auf dem Ringbalken angestrebt werden soll.	Wie Tucson/Pime SBC, jedoch mit einem Rasterabstand von 1,219 m	Wie Tucson/Pime SCB	**Methode 1:** Wie Tucson/Pime SBC, jedoch Verbindung der äußeren Hölzer über eine 12,7 mm Sperrholz- oder OSB-Platte auf der Oberseite der Kanthölzer, die max. 50,8 mm weniger breit sein darf, als die Strohballenwand. **Methode 2:** Wie Tucson/Pime SBC. **Methode 3:** 2 Kanthölzer 5,1/10,2 cm platziert wie in Methode 1, verbunden über 2,54/ 10,2 cm Binder werden mit armiertem Beton verfüllt. Der Verbund zum Strohballen wird über Ballennägel, die min. 0,46 m in den Ballen und 0,076 m in den Beton reichen, hergestellt.
Feuchtigkeitsschutz	Wasserdichte Lage unter dem ersten Ballen. Diffussionsoffene Sperre bis zu 1/3 der Wandhöhe erlaubt. Die Sperre muss min. 0,076 m auf das Fundament/den Sockel reichen und min. 0,152 m über eine Strohballenkante. Öffnungen sowie Mauerkronen sind speziell gegen eindringendes Wasser zu schützen		keine Angaben	Dampfdichte Materiali-en dürfen nicht in den oberen beiden Dritteln der Wand eingesetzt werden. Mit wasser-dichten Materialien zu schützen sind Fen-sterbrüstungen und Mauerkronen.	Wie Tucson/Pime SCB

	Tucson/Pime	Cortez	Boulder	Califrornia	Austin
Wandbekleidung	Wie Cortez SBC. Zusätzlich: Wetterseitige Lehmputze müssen stabilisiert werden.	Muss Schutz vor Mechanischer Beschädigung, Tieren, Feuer und (außen) Schlagregen bieten. Sb Wände, die an Badewannen, Duschen etc. anschließen, sind mit einer Wassersperre zu versehen oder es muss ein Luftspalt von min 88,9 mm vorgesehen werden. Zementputze sind mit Metallgeweben zu armieren. Dieses Gewebe muss in Abständen von max. 0,609 m horizontal und 0,406 m vertikal an der Sb Wand befestigt werden. Übergänge zu anderen Untergründen müssen min. 0,152 m mit Streckmetall od. vergleichbarem überdeckt werden. Lehmputze können direkt ohne Armierung auf die Ballen aufgebracht werden.		Zementputze müssen mit Drahtgeweben oder äquivalentem armiert werden, Lehmputze müssen nicht armiert werden. Lehmputze im Außenbereich müssen stabilisiert werden. Übergänge zu anderen Materialien müssen mit Streckmetall armiert werden.	Wie Cortez SBC
Elektroinstallationen	Nationale Installationsvorschriften beachten, bestimmte Kabel erlaubt, andere müssen in Schutzsystemen geführt werden.				
Installationen	In oder durch die Ballen: In Leerrohren. Wasserinstallation auf den Ballen: Zwischen Ballen und Rohr Wassersperren anbringen.				
Freistehende (Garten-) **Mauern** (6 Fuß hoch, nicht frostfrei gegründet, max Windgeschwindigkeit 75 mph)	Ballen liegend oder stehend einbaubar. Fundament: min. 0,283 m hohes Betonfundament in Ballenbreite. Verbindung Fundament/Ballen: Verstärkunsstäbe min. 9,5 mm Durchmesser in der Wandmitte, min. 0,102 m im Beton, min. 0,609 m im Ballen, 2 Stück pro Ballen Nägel: 2 pro Ballen min. 9,5 mm. Ein Putzträger ist kraftschlüssig mit Fundament und Ballen zu verbinden. Feuchtigkeitssperre zwischen Fundament und 1. Ballenlage und über der obersten Ballenlage. Diese Sperre muss min. 0,152 m beidseitig die Ballen abdecken. Putzarmierungen müssen über die Mauerkrone gezogen und in den Ballen befestigt werden. Zementputz oder stabilisierten Lehmputz verwenden. Min Dicke: 22,2 mm		keine Angaben		Wie Tucson/Pime SCB
Quelle:	Mayor and City Council of Tucso 1996	City of Cortez 1994	City of Boulder 1981	Sher, Richter, Woods, Johannessen 1995	City of Austin
Bemerkung	Ausnahmen zulässig, wenn die Planung durch einen staatl. zugelassenen Architekten oder Ingenieur erfolgt.				

Anhang III.4: Zu den Primärenergieinhalten der untersuchten Strohballenkonstruktionen

Inhalt

Betrachtet werden Wandelemente mit einer Höhe von ca. 2,75 m und einer Länge zwischen 4,72 und 5,06 m.

1 Primärenergieinhalte eingesetzter Baustoffe

1.1 Holz und Holzwerkstoffe

Werkstoffbezeichnung	Dichte (Mg/m³)	PEI (MJ/m³)	PEI (MJ/kg)	PEI (kWh/Mg)	Quelle
Kantholz, t.g.	0,45		4,7	1306	Waltjen 1999: 219
Brettholz	0,45		3,6	1000	Waltjen 1999: 219
Spanplatte	0,69	5818	8,4	2342	Hegger et.al. 2005: 101
OSB-Platte	0,62	4593	7,4	2058	Hegger et.al. 2005: 101
Kreuzlagenholz	0,43	2617	6,1	1691	Hegger et.al. 2005: 101 (Dreischichtplatte)
Bau-Funiersperrholz	0,49	4729	9,7	2681	Hegger et.al. 2005: 101

t.g.: technisch getrocknet

1.2 Dämmstoffe

Werkstoffbezeichnung	Dichte (Mg/m³)	PEI (MJ/kg)	PEI (kWh/Mg)	Quelle
HD-Ballen	0,115		63	Eigene Berechnungen (Anhang I.2)
Q-Ballen	0,13		50	Eigene Berechnungen (Anhang I.2)
Perlite	0,085	11	3056	Waltjen 1999: 198
Holzweichfaserplatte	0,17	15	4167	Waltjen 1999: 194

MW Dämmplatten	0,149	17,5	4861	Waltjen 1999: 209
EPS-Dämmplatten	0,018	95	26389	Waltjen 1999: 200

1.3 Stahl- und Eisenteile

Bauteilname	Werkstoff-bezeichnung	Dichte (Mg/m³)	PEI (MJ/kg)	PEI (kWh/Mg)	l (m)	b (m); Ø (m)	h (m)	Masse (Mg)	PEI Bauteil (kWh)	Quelle
Nagel 3,8x100	Stahl n.l.	7,85	43	11944	0,1	0,0038		8,90E-06	0,1063	Waltjen 1999: 268
Nagel 5,5x160	Stahl n.l.	7,85	43	11944	0,16	0,0055		2,98E-05	0,3564	Waltjen 1999: 268
Nagel 2,5x60	Stahl n.l.	7,85	43	11944				2,12E-06	0,0253	Waltjen 1999: 268, e.U
Nagel 1,8x50	Stahl n.l.	7,85	43	11944	0,05	0,0018		9,99E-07	0,0119	Waltjen 1999: 268, e.U
Tackerklammer	Stahl n.l.	7,85	43	11944	0,005	0,001		3,08E-08	0,0004	Waltjen 1999: 268
Lochplatten 60/140	Stahl n.l.	7,85	43	11944	0,06	0,14	0,002	1,32E-04	1,5752	Waltjen 1999: 268, Vormann 1998:11
Winkel 65/90	Stahl n.l.	7,85	43	11944				1,96E-04	2,3388	Waltjen 1999: 268, e.U
Windrispenband 2/40 (m)	Stahl n.l.	7,85	43	11944	1	0,04	0,002	6,28E-04	7,5011	Waltjen 1999: 268, e.B.
Schraube 3,5x25	Stahl n.l.	7,85	43	11944				1,11E-06	0,0132	Waltjen 1999: 268, e.U
Schraube 3,5x30	Stahl n.l.	7,85	43	11944				1,33E-06	0,0158	Waltjen 1999: 268, e.B.
Schraube 4,5x50	Stahl n.l.	7,85	43	11944				3,29E-06	0,0393	Waltjen 1999: 268, e.B.
Schraube 4,5x60	Stahl n.l.	7,85	43	11944				3,95E-06	0,0472	Waltjen 1999: 268, e.U
Schraube 6x80	Stahl n.l.	7,85	43	11944				9,63E-06	0,1151	Waltjen 1999: 268, e.U
Schraube 6x100	Stahl n.l.	7,85	43	11944				1,16E-05	0,1387	Waltjen 1999: 268, e.U
Schraube 6x120	Stahl n.l.	7,85	43	11944				1,37E-05	0,1638	Waltjen 1999: 268, e.U
Schraube 6x160	Stahl n.l.	7,85	43	11944				1,86E-05	0,2219	Waltjen 1999: 268, e.B.
Halfe (pro Meter)	Stahl n.l.	7,85	43	11944	1	0,07	0,002	1,10E-03	13,1269	Waltjen 1999: 268, e.S.
Halfenanker	Stahl n.l.	7,85	43	11944	0,108	0,035	0,004	1,19E-04	1,4177	Waltjen 1999: 268, Vormann 1998:11
Klammer f. Verpackungsband	Stahl n.l.	7,85	43	11944				1,66E-05	0,1981	Waltjen 1999: 268, e.U
Baustahl	Stahl u.l.	7,85	36	10000						Waltjen 1999: 269
Ringschraube	Stahl n.l.	7,85	43	11944				3,82E-06	0,0457	Waltjen 1999: 268, e.U
Schlossschraube M12x140 mm mit Unterlegscheibe und Mutter	Stahl n.l.	7,85	43	11944				1,69E-04	2,0217	Waltjen 1999: 268, e.U

n.l.: niedrig legiert; u.l.: unlegiert; e.U.: eigene Untersuchungen, siehe unten; e.B.: eigene Berechnung; e.S.: eigene Schätzung

1.4 Mineralische Baustoffe

Werkstoffbezeichnung	Dichte (Mg/m³)	PEI (MJ/kg)	PEI (kWh/Mg)	Quelle
Lehmputz	1,7	0,5	139	Waltjen 1999: 184
Kalkputz	1,2	1,5	417	Waltjen 1999: 180
Kunstharzputz	1,1	5,1	1417	Waltjen 1999: 183
Zementmörtel	2,1	1,4	389	Waltjen 1999: 186, Schneider 2002: 3.4
Kalksandstein	2,2	1,15	319	Eyerer/Reinhardt 2000: 77, Schneider 2002: 3.5
Pflanzsubstrat	0,5	0,1	28	Waltjen 1999: 267

1.5 Sonstige Stoffe und Bauteile

Bauteilname	Werkstoff-bezeichnung	Flächengewicht (Mg/m²)	PEI (MJ/kg)	PEI (kWh/Mg)	PEI m² (kWh)	Quelle
Putzarmierung	Jute	0,0002	28	7778	1,56	Waltjen 1999: 266
Baupapier	Baupapier	0,0003	19	5278	1,58	Waltjen 1999: 252
Mineral. Kleber	Mineral. Kleber	0,01	14	3889	38,89	Waltjen 1999: 48
Glasfaserarmierung	Glasfaserarmier	0,0002	92	25556	5,11	Waltjen 1999: 48
PE-Folie	Polyetylen-Bahr	0,00022	87	24167	5,32	Waltjen 1999: 257
PVC-Dichtungsbahn	PVC-Dichtungsb	0,001	53	14722	14,72	Waltjen 1999: 260
Betondachsteine	Betondachsteine	0,045	2,4	667	30,00	Waltjen 1999: 238
Faserzementwellplatten	Faserzement-Da	0,015	14	3889	58,33	Waltjen 1999: 241

Bauteilname	Werkstoffbezeichnung	Dichte (Mg/m³)	PEI (MJ/kg)	PEI (kWh/Mg)	l (m) od d (m)	Ø (m) od. b (m)	Masse (Mg) od. (Mg/m)	PEI Bauteil (kWh)	Quelle
Strohschraube	Polyamid	1,15	63	17500	0,25	0,02	9,0E-05	1,58	Waltjen 1999: 274, e.S.
Verpackungsband 16 mm	Polyamid	1,15	63	17500	0,023	0,001	1,1E-05	0,19	Waltjen 1999: 274, e.U.
Dübel S8	Polyamid	1,15	63	17500			1,3E-06	0,02	Waltjen 1999: 274, e.U.
Ballengarn (pro m) bei Gar	Polyamid	1,15	63	17500				0,04	Waltjen 1999: 274, e.B.

e.S.: eigene Schätzung; e.U.; eigene Untersuchung, siehe unten; e.B.: eigene Berechnung

2 Ermittlung des Primärenergieinhaltes

2.0 Zusammenfassung

2.0.0 Überblick

Nr.	Konstruktionssystem	PEI (kWh/m²)
1	Innenskelett HD-Ballen fl (Lehmputz/Lehmputz)	58,8
1a	Innenskelett HD-Ballen fl (Lehmputz/Schalung)	70,1
2	Ballenbündiges Skelett HD-Ballen fl (Lehmputz/Schalung)	69,6
3	Fugenorientiertes ballenbündiges Skelett Q- Ballen stehend 70 cm (Lehmputz/Schalung)	49,0
3a	Fugenorientiertes ballenbündiges Skelett Q- Ballen stehend 90 cm (Lehmputz/Schalung)	52,4
3b	Fugenorientiertes ballenbündiges Skelett Q- Ballen stehend 130 cm (Lehmputz/Schalung)	60,2
4	Außenskelett HD-Ballen hl (Lehmputz/Schalung)	59,9
5	Doppelskelett HD-Ballen hl (Lehmputz/Schalung)	47,2
6	Rahmensystem HD-Ballen hl od. stehend (Lehmputz/Lehmputz)	54,6
6a	Rahmensystem HD-Ballen hl od. stehend (Lehmputz/Schalung)	62,9
6b	Rahmensystem AbZ HD-Ballen hl od. stehend (OSB/Schalung)	95,8
7	1.7 Scheibentragwerk (Putz/Schalung)	94,7
8	1.8 System Gagné (Putz/Schalung)	94,3
9	2.1 Offenes System California Straw Bale Code (Putz/Schalung)	71,6
10	2.2 Gewölbe (Putz/Schalung)	35,2
11	2.3 System Stroh unlimited (Putz/Schalung)	64,9
12	System E+ HD-Ballen 36 cm HD-Ballen hl (Putz/Schalung)	82,3
12a	System E+ HD-Ballen 70 cm Q-Ballen hl (Putz/Schalung)	100,6
12b	System E+ HD-Ballen 90 cm Q-Ballen hl (Putz/Schalung)	110,4
12c	System E+ HD-Ballen 130 cm Q-Ballen hl (Putz/Schalung)	130,7
2.13	Lasttragend, Kriechen zugelassen 36 cm HD-Ballen (Putz/schalung)	51,7
2.14	Rahmensystem mit Mineralwolledämmung (Kunstharzputz/Schalung)	260,2
2.15	KS-Wand mit EPS-Dämmung U 0,14 (Kalkputz/Kunstharzputz)	309,7
2.15a	KS-Wand mit EPS-Dämmung U 0,07 (Kalkputz/Kunstharzputz)	429,6
2.15b	KS-Wand mit EPS-Dämmung U 0,06 (Kalkputz/Kunstharzputz)	499,7
2.15c	KS-Wand mit EPS-Dämmung U 0,04 (Kalkputz/Kunstharzputz)	640,3
2.16	Gründach 1 m Sparrenabstand (pro m²)	64,6
2.16a	Gründach 0,53 m Sparrenabstand (pro m²)	75,7

2.16b	Ziegeldach 1 m Sparrenabstand (pro m²)	83,6
2.16c	Ziegeldach 0,53 m Sparrenabstand (pro m²)	95,6
2.16d	Wellfaserzementdach 1 m Sparrenabstand (pro m²)	110,2
2.16e	Wellfaserzementdach 0,53 m Sparrenabstand (pro m²)	122,2

Beispielberechnung des Primärenergieinhaltes für ein nicht lasttragendes System

2.3 Fugenorientiertes ballenbündiges Skelett Q- Ballen stehend 70 cm (Lehmputz/Schalung)

Bauteil	Anzahl (Stück), Fläche (m²)	l (m)	b (m) od. Ø (m)	h (m)	Werkstoff-bezeichnung	Dichte (Mg/m³)	Masse (Mg)	PEI (kWh/Mg), (kWh/Stück), (kWh/m²)	PEI Bauteil (kWh)
Schwelle	1	4,8	0,08	0,06	Kantholz, t.g.	0,45	0,010	1306	13,5
Stützen	5	2,75	0,08	0,08	Kantholz, t.g.	0,45	0,040	1306	51,7
Lochplatten 60/140	5				Stahl n.l.		0,001	1,58	7,9
Nagel 2,5x60	50				Stahl n.l.		1,06E-04	0,025	1,26
Pfetten	1	4,8	0,06	0,14	Kantholz, t.g.	0,45	0,018	1306	23,7
Schlossschraube M12x140 mm mit Unterlegscheibe und Mutter	10				Stahl n.l.		0,00169	2,02	20,2
Lagerholz	1	4,8	0,12	0,06	Kantholz, t.g.	0,45	0,016	1306	20,3
Perlite	1	4,8	0,62	0,06	Perlite	0,085	0,015	3056	46,4
Ausfachung	1	4,8	0,7	2,69	Q-Ballen	0,133	1,202	50	60,1
Lattung	3	4,8	0,06	0,04	Kantholz, t.g.	0,45	0,016	1306	20,3
Holzdübel	1	14	0,02		Kantholz, t.g.	0,45	0,004	1306	5,7
Verpackungsband 16 mm (pro m)	30							0,19	5,7
Klammer f. Verpackungsband	15				Stahl n.l.		2,49E-04	0,20	3,0
Putzarmierung	3,5				Jute			1,56	5,4
Baupapier	0,5				Baupapier			1,58	0,8
Tackerklammern	140				Stahl n.l.		4,32E-06	0,0004	0,1
Innenputz	1	4,8	0,04	2,61	Lehmputz	1,7	0,852	139	118,3
Außenputz	1	4,8	0,01	2,61	Lehmputz	1,7	0,213	139	29,6

Lattung	5,8	2,75	0,05	0,03	Kantholz, t.g.	0,45	0,011	1306	14,1
Schraube 6x80	23,2				Stahl n.l.		2,23E-04	0,12	2,7
Stülpschalung	33	4,8	0,022	0,12	Brettholz	0,45	0,188	1000	188,2
Schrauben 4,5x60	155				Stahl n.l.		0,001	0,05	7,3
				Summe Masse Stahl Mg	0,004	Summe Masse Holz Mg	0,303	**Summe Wand**	**646,2**
				pro m² kg	0,283	pro m² kg	24,150667	**kWh/m²**	**49,0**

Beispielberechnung des Primärenergieinhaltes für ein lasttragendes System

2.12 System E^{+} HD-Ballen 36 cm HD-Ballen hl (Putz/Schalung)

Bauteil	**Anzahl (Stück), Fläche (m²), Volumen (m³)**	**l (m) od A (m²) od V (m³)**	**b (m) od Ø (m)**	**h (m)**	**Werkstoff-bezeichnung**	**Dichte (Mg/m³)**	**Masse (Mg)**	**PEI (kWh/Mg), (kWh/Stück), (kWh/m²)**	**PEI Bauteil (kWh)**
Lasteinleitungsplatten Kanthölzer	6	4,72	0,04	0,06	Kantholz, t.g.	0,45	0,031	1306	39,9
Lasteinleitungsplatten Kanthölzer	4	4,72	0,03	0,05	Kantholz, t.g.	0,45	0,013	1306	16,6
Lasteinleitungsplatten Sperrholz	9,8		0,02		Bau-Furniersperrh	0,49	0,096	2681	257,5
Schraube 4,5x60	254				Stahl n.l.		0,001	0,047	12,0
Lasteinleitungsplatten Dämmung	2	4,72	0,14	0,06	Holzweichfaserpl	0,17	0,013	4167	56,2
Seitl. Begrenzung Sperrh	2	2,75	0,02	0,7	Bau-Furniersperrh	0,49	0,038	2681	101,1
Seitl. Begr. Dachlatte	4	2,75	0,03	0,05	Bau-Furniersperrh	0,49	0,008	2681	21,7
Leiterrahmen Kanthölzer	8	4,72	0,03	0,05	Kantholz, t.g.	0,45	0,025	1306	33,3
Schraube 4,5x50	96				Stahl n.l.			0,039	3,8
Leiterrahmen Sprossen	1,12		0,02		Bau-Furniersperrh	0,49	0,011	2681	29,5
Schraube 6x80	36				Stahl n.l.		0,0003	0,12	4,1
Schraube 6x100	36				Stahl n.l.		0,0004	0,14	5,0
lasttragende Strohballen	1	4,72	0,36	2,55	HD-Ballen	0,1242	0,538	63	33,9

Äußere Spannelemente Sperrholzstreifen	6	2,75	0,1	0,02	Bau-Furniersperrh	0,49	0,016	2681	43,3
Schraube 4,5x60	100				Stahl n.l.		0,0004	0,047	4,7
Innere Spannelemente Windrispenbänder	8,25				Stahl n.l.		0,005	7,5	61,9
Schraube 3,5x30	60				Stahl n.l.		0,000	0,02	1,0
Innenputz	1	4,72	2,75	0,04	Lehmputz	1,7	0,883	139	122,6
Außenputz	1	4,72	2,75	0,01	Lehmputz	1,7	0,221	139	30,6
Putzarmierung	5,62				Jute			1,56	8,7
Tackerklammern	198				Stahl n.l.		0,000	0,0004	0,07
Stülpschalung	31	4,72	0,022	0,12	Brettholz	0,45	0,174	1000	173,8
Schraube 4,5x50	186				Stahl n.l.		0,001	0,039	7,3
				Masse Stahl Mg	0,008	Masse Holz Mg	0,425	**Summe Wand**	**1068,7**
				pro m² kg	0,62	pro m² kg	32,754888	**kWh/m²**	**82,3**

Beispielberechnung des Primärenergieinhaltes für ein Dach

2.16a Gründach 0,53 m Sparrenabstand (pro m²)

Bauteil	**Anzahl**	**l (m)**	**b (m)**	**h (m)**	**Werkstoff-bezeichnung**	**Dichte (Mg/m³)**	**Masse (Mg)**	**PEI (kWh/Mg), (kWh/Stück), (kWh/m²)**	**PEI Bauteil (kWh)**
OSB-Platte	1	1	1	0,02	OSB-Platte	0,62	0,012	2058	25,5
PE-Folie	1				PE-Folie			5,3	5,3
Kantholz, t.g.	1,89	1	0,06	0,36	Kantholz, t.g.	0,45	0,018	1306	23,9
HD-Ballen	1,89	1	0,48	0,36	HD-Ballen	0,115	0,037	63	2,4
Dachlatte	2	1	0,05	0,03	Kantholz, t.g.	0,45	0,001	1306	1,8
PVC-Dichtungsbahn	1				PVC-			14,72	14,7
Pflanzsubstrat	1	1	1	0,15	Pflanzsubstrat	0,5	0,075	28	2,1
								kWh/m²	**75,7**

3 Gewichtsbestimmung von Verbindungsmitteln zur Berechnung des Primärenergieinhaltes

Verwendete Wage: Kern 572-37

Werkstück	**Marke**	**Bit**	**Anzahl**	**Gewicht (g)**	**Gewicht pro Stück; pro m**	**Gewicht pro Stück; pro m (Mg)**
Schraube, 3,5x25 mm	suki	TX 10	100	110,56	1,11	1,11E-06
Schraube, 4,5x60 mm	suki	TX 20	100	395,05	3,95	3,95E-06
Schraube 6,0x80 mm	suki	TX 25	50	481,61	9,63	9,63E-06
Schraube, 6,0x100 mm	suki	TX 25	50	580,66	11,61	1,16E-05
Schraube 6,0x120 mm	suki	TX 25	10	137,16	13,72	1,37E-05
Ringschraube 20x10x3,3 mm	suki		6	22,94	3,82	3,82E-06
Schlossschraube M12x160 mm mit Unterlegscheibe und Mutter	suki		1	169,26	169,26	1,69E-04
Nagel 2,5x60			35	74,12	2,12	2,12E-06
Klemme für Verpackungsband 16			3	49,76	16,59	1,66E-05
Dübel S 8 GK	fischer		20	26,4	1,32	1,32E-06
Verpackungsband 12 mm (m)			2	11,88	5,94	5,94E-06
Verpackungsband 16 mm (m)			2	21,57	10,79	1,08E-05
Winkel 65/90			1	195,81	195,81	1,96E-04

Anhang III.5: Zu den Wärmedurchgangskoeffizienten der untersuchten Strohballenkonstruktionen

Inhalt

1. Verwendete Formeln

1.1 Wärmedurchlasswiderstand R (m²K/W)

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

dabei ist:	R:	Wärmedurchlasswiderstand (m²K/W)
	d:	Schichtdicke (m)
	λ:	Wärmeleitfähigkeit (W/(mK))

1.2 Wärmedurchgangswiderstand R_T (m²K/W) mehrschichtiger homogener Bauteile

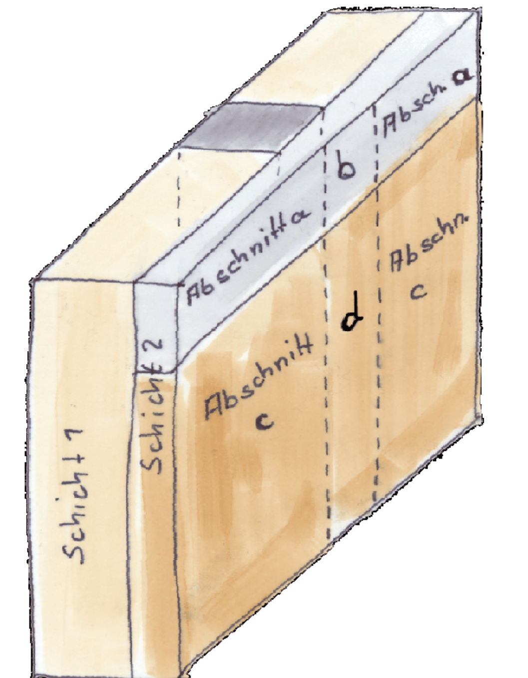
$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + ... + R_n + R_{se}$$

dabei ist:	R_T:	Wärmedurchgangswiderstand (m²K/W)
	R_{si}:	Wärmeübergangswiderstand innen (m²K/W)
	R_1, R_2, ...:	Wärmedurchlasswiderstände der betr. Bauteilschicht (m²K/W)
	R_{se}:	Wärmeübergangswiderstand außen (m²K/W)

1.3 Wärmedurchgangswiderstand R_T (m²K/W) mehrschichtiger inhomogener Bauteile nach DIN EN ISO 6946

Das in DIN EN ISO 6946 zur Verfügung gestellte Verfahren ist ein Näherungsverfahren zur Ermittlung der Wärmedurchgangswiderstände mehrschichtiger inhomogener Bauteile. Es darf nicht angewendet werden, wenn metallische Bauteile wärmedämmende Schichten durchstoßen. Wenn Bauteile mit deutlich unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten nebeneinanderliegen, ist mit signifikanten Fehlern hin zu niedrigeren R_T- Werten zu rechnen.

Zur Ermittluing des Wärmedurchlasswiderstandes wird ein Bauteil in Schichten (1, 2, 3, …) und Abschnitte (a, b, c, …) eingeteilt. Durch Bildung des Kehrwertes der Aufsummierten Teilwärmedurchlasswiderstände der einzelnen Bauteilabschnitte wird zunächst der obere Grenzwert des Wärmedurchlasswiderstandes gebildet. Durch Aufsummierung der Teilwärmedurchlasswiderstände der einzelnen Bauteilschichten wird der obere Grenzwert des Wärmedurchlasswiderstandes gebildet. Der Wärmedurchlasswiderstand des Bauteils entspricht dem arithmetischen Mittel aus oberem und unterem Grenzwert.



$$R_T = \frac{R_T' + R_T''}{2}$$

dabei ist: R_T': der obere Grenzwert des Wärmedurchgangswiderstandes (m²K/W)
R_T'': der untere Grenzwert des Wärmedurchgangswiderstandes (m²K/W)

$$R_T' = \frac{1}{\frac{f_a}{R_{Ta}} + \frac{f_b}{R_{Tb}} + \ldots + \frac{f_n}{R_{Tn}}}$$

dabei ist: $f_a, f_b, \ldots, f_n$ Teilflächen der Abschnitte a-n (m²)
$R_{Ta}, R_{Tb}, \ldots, R_{Tn}$ Wärmedurchgangswiderstände der jeweiligen Abschnitte (m²K/W)
Die Wärmedurchgangswiderstände der jeweiligen Abschnitte werden nach 1.2 berechnet.

$$R_T'' = R_{si} + R_{S1} + R_{S2} + \ldots + R_{Sn} + R_{se}$$

dabei ist: R_{si}: Wärmeübergangswiderstand innen (m²K/W)
$R_{S1}, R_{S2}, \ldots, R_{Sn}$: Wärmedurchgangswiderstände der jeweiligen Bauteilschicht (m²K/W)

$$R_{S1} = \frac{1}{\frac{f_a}{R_{aS1}} + \frac{f_b}{R_{bS1}} + \ldots \frac{f_n}{R_{nS1}}}$$

dabei ist: R_{S1}: Wärmedurchgangswiderstand der Schicht 1 (m²K/W)
$f_a, f_b, \ldots, f_n$ Teilflächen der Abschnitte a-n (m²)
$R_{aS1}, R_{bS1}, \ldots, R_{nS}$ Wärmedurchgangswiderstände der jeweiligen Abschnitte in Schicht 1(m²K/W)
Die Wärmedurchlasswiderstände aller weiteren Schichten werden analog berechnet.

1.4 Wärmedurchgangskoeffizient U (W/(m²K))

$$U = \frac{1}{R_T}$$

dabei ist: U: Wärmedurchgangskoeffizient (W/(m²K))
R_T: Wärmedurchgangswiderstand (m²K/W)

2. Verwendete Daten und Werte

2.1 Wärmeübergangswiderstände

Wärmeübergangswiderstand	Richtung des Wärmestromes horizonal (m²K/W)	aufwärts (m²K/W)	abwärts (m²K/W)	Quelle
Innen R_{si}	0,13	0,1	0,17	Willems/Schild/Dinter 2006: 2.9
Außen R_{se}	0,04	0,04	0,04	Willems/Schild/Dinter 2006: 2.9
Ein Wärmestrom gilt bis zu einer (Dach-) Neigung von +/- 30° als horizontal.				

2.2 λ-Werte verwendeter Baustoffe

Baustoff	λ (W/(mK)	Dichte (Mg/m³)	Quelle
Lehmputz	0,800	1,7	Waltjen 1999: 184
Strohballen, Wärmestrom parallel zur Faser	0,080	0,09-0,11	DiBt 2006
Strohballen, Wärmestrom senkr. zur Faser	0,052	0,09-0,11	DiBt 2006
Nadelholz	0,110	0,45	Waltjen 1999: 219
Zementmörtel	1,600	2,1	Schneider 2002: 3.4, 10.18
Holzweichfaserplatte	0,045	0,17	Waltjen 1999: 194
Kalkputz	0,6	1,2	Waltjen 1999: 180
Kunstharzputz	0,7	1,1	Waltjen 1999: 183
EPS Fassadendämmplatte	0,04	0,018	Waltjen 1999: 200
Kalksandstein	1,3	2,2	Schneider 2002:10.21
Graspolster, dicht	0,17		Minke 2000: 15
Erdfeuchtes Substrat	0,6		Minke 2000: 15
Anhydridestrich	0,7		Waltjen 1999: 224

Sand	0,7	Waltjen 1999: 171

2.3 Bewertung hinterlüfteter Stülpschalungen und Dacheindeckungen

Der Luftraum zwischen Wand und Stülpschalung bzw. Dach und Dacheindeckung wird als stark belüftete Luftschicht gesehen. In diesem Fall ist der äußere Wärmeübergangswiderstand gleich dem inneren Wärmeübergangswiderstand. Die Verschalung selbst geht nicht weiter in die Berechnung des Wärmedurchgangswiderstandes ein.

Kondition	**Richtung des Wärmestromes** horizonal (m²K/W)	aufwärts (m²K/W)	Quelle
Stark belüftete Luftschicht: R_{se}=R_{si}	0,13	0,04	Willems/Schild/Dinter 2006: 2.9, 2.13

3. R_T- und U-Werte verschiedener Schichtfolgen

Beispiele für die Berechnung von Schichtfolgen

3.1 Putz 4 cm - HD-Ballen parallel 48 cm - Putz 4 cm

Schicht	**Schichtdicke (m)**	**λ (W/(mK)**	**R (m²K/W)**	
Wärmeübergangswiderstand innen R_{si}			0,13	
Lehmputz	0,04	0,800	0,05	
Strohballen, Wärmestrom parallel zur Faser	0,48	0,080	6,00	
Lehmputz	0,04	0,800	0,05	
Wärmeübergangswiderstand außen R_{se}			0,04	
	Wärmedurchgangswiderstand R_T		6,27	m²K/W
	Wärmedurchgangskoeffizient U		0,159	W/m²K

3.1d Putz 4 cm - Holz 12 cm - Stroh parallel 36 cm - Putz 1 cm - Schalung

Schicht	**Schichtdicke (m)**	**λ (W/(mK)**	**R (m²K/W)**

Wärmeübergangswiderstand innen R_{si}			0,13
Lehmputz	0,04	0,800	0,05
Nadelholz	0,12	0,110	1,09
Strohballen, Wärmestrom parallel zur Faser	0,36	0,080	4,50
Lehmputz	0,04	0,800	0,05
Wärmeübergangswiderstand außen R_{se}			0,04
Wärmedurchgangswiderstand R_T (m²K/W)			5,86 m²K/W
Wärmedurchgangskoeffizient U (W/m²K)			0,171 W/m²K

3.2 Putz 4 cm - Stroh senkrecht 70, 90, 130 cm - Putz 1 cm - Stülpschalung

		3.2		**3.2-1**		**3.2-2**	
Schicht	**λ (W/(mK)**	**Schichtdicke (m)**	**R (m²K/W)**	**Schicht-dicke (m)**	**R (m²K/W)**	**Schicht-dicke (m)**	**R (m²K/W)**
Wärmeübergangswiderstand innen R_{si}			0,13		0,13		0,13
Lehmputz	0,800	0,04	0,05	0,04	0,05	0,04	0,05
Strohballen, Wärmestrom senkr. zur Faser	0,052	0,70	13,46	0,90	17,31	1,30	25,00
Lehmputz	0,800	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Stark belüftete Luftschicht: Rse=Rsi			0,13		0,13		0,13
Wärmedurchgangswiderstand R_T (m²K/W)			13,78		17,63		25,32
Wärmedurchgangskoeffizient U (W/m²K)			0,073		0,057		0,039

4. Ermittlung der R_T- und U-Werte verschiedener Wandkonstruktionen nach DIN EN ISO 6946

Das in DIN EN ISO 6946 zur Verfügung gestellte Verfahren ist ein Näherungsverfahren zur Ermittlung der Wärmedurchgangswiderstände mehrschichtiger inhomogener Bauteile. Es darf nicht angewendet werden, wenn metallische Bauteile wärmedämmende Schichten durchstoßen. Wenn Bauteile mit deutlich unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten nebeneinanderliegen, ist mit signifikanten Fehlern zu rechnen.

4.0 Zusammenfassung

Nr.	System	R_T (m²K/W)	U (W/(m²K))
4.1	Innenskelett HD-Ballen fl 48 cm (Putz-Putz)	6,41	0,156

4.1a	Innenskelett HD-Ballen fl 48 cm (Putz-Schalung)	6,46	0,155	Innensk. 48
4.2	Ballenbündigeskelett HD-Ballen fl 48 cm (Putz-Schalung)	6,46	0,155	Bb 48
4.3	Fugenorientiertes ballenbündiges Skelett Q-Ballen stehend 70 cm (Putz-Schalung)	13,70	0,073	Fo bb 70
4.3a	Fugenorientiertes ballenbündiges Skelett Q-Ballen stehend 90 cm (Putz-Schalung)	15,84	0,063	
4.3b	Fugenorientiertes ballenbündiges Skelett Q-Ballen stehend 130 cm (Putz-Schalung)	25,24	0,040	
4.4	Außenskelett HD-Ballen hl 36 cm (PutzSchalung)	7,22	0,139	Außensk. 36
4.5	Doppelskelett, HD-Ballen hl (Putz-Schalung)	7,27	0,138	Doppelsk. 36
4.6	Rahmensystem, HD-Ballen hl oder stehend 36 cm (Putz-Putz)	6,24	0,160	
4.6a	Rahmensystem, HD-Ballen hl oder stehend (Putz-Schalung)	6,21	0,161	Rahmen 36
4.6b	Rahmensystem, Strohballeneinbau hochkant liegend oder stehend AbZ (OSB-Schalung)	7,00	0,143	Rahmen 36 AbZ
4.7	Scheibentragwerk HD-Ballen hl od. stehend (Putz-Schalung)	8,06	0,124	Scheibe 36
4.8	System Gagné (Putz-Schalung)	1,42	0,702	Gagné 48
4.9	Offenes System California Straw Bale Code (Putz/Schalung)	6,32	0,158	California 48
4.10	Offenes System: Gewölbekonstruktion (Putz-Schalung)	7,20	0,139	Gewölbe 36
4.11	System Stroh Unlimited HD-Ballen fl 48 cm (Putz-Schalung)	6,33	0,158	Stroh unlimited 48
4.12	System E+ 36 cm Stroh (Putz-Schalung)	7,02	0,142	E+ 36
4.12a	System E+ 70 cm Stroh (Putz-Schalung)	13,33	0,075	
4.12b	System E+ 90 cm Stroh (Putz-Schalung)	17,04	0,059	
4.12c	System E+ 130 cm Stroh (Putz-Schalung)	24,47	0,041	
3.14	KS-Wand mit EPS-Dämmung U 0,14 (Kalkputz/Kunstharzputz)	6,96	0,144	
3.14a	KS-Wand mit EPS-Dämmung U 0,07 (Kalkputz/Kunstharzputz)	13,28	0,075	
3.14b	KS-Wand mit EPS-Dämmung U 0,06 (Kalkputz/Kunstharzputz)	16,96	0,059	
3.14c	KS-Wand mit EPS-Dämmung U 0,04 (Kalkputz/Kunstharzputz)	24,36	0,041	
4.15	Gründach Sparrenabstand 1 m	7,65	0,131	
4.15a	Gründach Sparrenabstand 0,53 m	7,33	0,136	
4.15b	Hinterlüftetes Dach Sparrenabstand 1 m	6,88	0,145	
4.15c	Hinterlüftetes Dach Sparrenabstand 0,53 m	6,55	0,153	
4.15d	Gründach 70 Sparrenabstand 1,2 m	14,23	0,070	
3.16	Fußbodenaufbau 36 cm Stroh	7,38	0,1355	
3.16a	Fußbodenaufbau 70 cm Stroh	13,92	0,0719	

Beispiele für die Ermittelung der R_T - und U-Werte verschiedener Wandkonstruktionen nach DIN EN ISO 6946

4.1 Innenskelett HD-Ballen fl 48 cm (Putz-Putz)

Berechnung des oberen Grenzwertes R'_T des Wärmedurchgangswiderstandes

Abschnitte	a Putz-Stroh-Putz	b Putz-Stroh-Holz-Stroh-Putz	c Putz-HWP-Holz-HWP-Putz	
Entspricht Schichtfolge	3.1	3.1a	3.3	
Fläche	f_a	f_b	f_c	Kontrolle
(m²)	11,40	0,45	1,1328	12,98
Flächenanteile (-)	0,88	0,03	0,09	1,00
Wärmedurchgangswiderst. der Schichtfolge	R_{Ta}	R_{Tb}	R_{Tc}	
(m²K/W)	6,27	5,86	9,36	

R'_T $(1/(f_a/R_{Ta}+f_b/R_{Tb}+fc/RTc))$ 6,44 (m²K/W)

Berechnung des unteren Grenzwertes R''_T des Wärmedurchgangswiderstandes

Schicht	1. Lehm	2. Stroh-HLP	3. Stroh-Holz	4. Stroh-HLP	5. Lehm
Schichtdicke d_{mj} (m)	0,04	0,18	0,12	0,18	0,04
Wärmeleitwert λ_{aj} (W/mK)	0,800	0,080	0,080	0,080	0,800
Wärmedurchlasswiderst. R_{aj} (d_{mj}/λ_{aj}) (m²K/W)	0,05	2,25	1,50	2,25	0,05
Wärmeleitwert λ_{bj} (W/mK)	0,800	0,080	0,110	0,080	0,800
Wärmedurchlasswiderst. R_{bj} (d_{mj}/λ_{bj}) (m²K/W)	0,05	2,25	1,09	2,25	0,05
Wärmeleitwert λ_{cj} (W/mK)	0,800	0,045	0,110	0,045	0,800
Wärmedurchlasswiderst. R_{cj} (d_{mj}/λ_{bj}) (m²K/W)	0,05	4,00	1,09	4,00	0,05
Wärmedurchlasswiderst. R_j	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5
(1/(fa/Raj+fb/Rbj+fc/Rcj))					
(m²K/W)	0,05	2,34	1,43	2,34	0,05

Wärmedurchlasswiderstand innen R_{si}	0,13	m²K/W
Wärmedurchlasswiderstand innen R_{se}	0,04	m²K/W
R''_T $(R_{si}+R_1+R_2+R_3+R_4+R_5+R_{se})$	6,38	m²K/W
Wärmedurchgangswiderst. R_T $((R'_T+R''_T)/2)$	**6,41**	**m²K/W**
Wärmedurchgangskoeffizient U $(1/R_T)$	**0,156**	**W/(m²K)**

4.3 Fugenorientiertes ballenbündiges Skelett Q-Ballen stehend 70 cm (Putz-Schalung)

Berechnung des oberen Grenzwertes R'_T des Wärmedurchgangswiderstandes

Abschnitte	a Putz-Stroh-Schalung	b Putz-Holz-Stroh-Schalung	c Holz-Stroh-Schalung	
Entspricht Schichtfolge	3.2	3.2a	3.2b	
Fläche	f_a	f_b	f_c	Kontrolle
(m²)	11,43	1,10	0,67	13,20
Flächenanteile (-)	0,87	0,08	0,05	1,00
Wärmedurchgangswiderst. der Schichtfolge	R_{Ta}	R_{Tb}	R_{Tc}	
(m²K/W)	13,78	12,97	14,28	

R'_T (1/(f_a/R_{Ta}+f_b/R_{Tb}+fc/RTc))	13,74	(m²K/W)

Berechnung des unteren Grenzwertes R''_T des Wärmedurchgangswiderstandes

Schicht	1. Lehm-Holz	2. Stroh-Holz	3. Stroh	4. Lehm
Schichtdicke d_{mj} (m)	0,04	0,08	0,62	0,01
Wärmeleitwert λ_{aj} (W/mK)	0,800	0,052	0,052	0,800
Wärmedurchlasswiderst. R_{aj} (d_{mj}/λ_{aj}) (m²K/W)	0,05	1,54	11,92	0,01
Wärmeleitwert λ_{bj} (W/mK)	0,800	0,110	0,052	0,800
Wärmedurchlasswiderst. R_{bj} (d_{mj}/λ_{bj}) (m²K/W)	0,05	0,73	11,92	0,01
Wärmeleitwert λ_{cj} (W/mK)	0,110	0,052	0,052	0,800
Wärmedurchlasswiderst. R_{cj} (d_{mj}/λ_{bj}) (m²K/W)	0,36	1,54	11,92	0,01
Wärmedurchlasswiderst. R_j	R_1	R_2	R_3	R_4
(1/(fa/Raj+fb/Rbj+fc/Rcj))				
(m²K/W)	0,05	1,41	11,92	0,01

Wärmedurchlasswiderstand innen R_{si}	0,13	m²K/W
Stark belüftete Luftschicht: Rse=Rsi	0,13	m²K/W
R''_T (R_{si}+R_1+R_2+R_3+R_4+R_{se})	13,66	m²K/W
Wärmedurchgangswiderst. R_T ((R'_T+R''_T)/2)	**13,70**	**m²K/W**
Wärmedurchgangskoeffizient U (1/R_T)	**0,073**	**W/(m²K)**

4.11 System Stroh Unlimited HD-Ballen fl 48 cm (Putz-Schalung)

Berechnung des oberen Grenzwertes R'_T des Wärmedurchgangswiderstandes

Abschnitte	a Putz-Stroh-Putz	b Putz-Stroh-Holz-Stroh-Putz	c Putz-Holz-Putz	d Putz-Holz-HWP-Holz-HWP-Holz	
Entspricht Schichtfolge	3.1	3.2c-1	3.4-1	3.3d	
Fläche	f_a	f_b	f_c	f_d	Kontrolle
(m²)	12,08	0,41	0,2	0,3	12,99
Flächenanteile (-)	0,93	0,03	0,02	0,02	1,00
Wärmedurchgangswiderst. der Schichtfolge	R_{Ta}	R_{Tb}	R_{Tc}	R_{Td}	
(m²K/W)	6,27	6,42	5,18	10,70	
R'_T $(1/(f_a/R_{Ta}+f_b/R_{Tb}))$	6,31	(m²K/W)			

Berechnung des unteren Grenzwertes R''_T des Wärmedurchgangswiderstandes

Schicht	1. Lehm	2. Lehm-Holz	3. Stroh-Holz	3. Stroh-Holz	4. Stroh-Holz	6. Lehm-Holz
Schichtdicke d_{mj} (m)	0,01	0,03	0,2	0,08	0,2	0,03
Wärmeleitwert λ_{aj} (W/mK)	0,800	0,800	0,080	0,080	0,080	0,800
Wärmedurchlasswiderst. R_{aj} (d_{mj}/λ_{aj}) (m²K/W)	0,01	0,04	2,50	1,00	2,50	0,04
Wärmeleitwert λ_{bj} (W/mK)	0,800	0,800	0,080	0,110	0,080	0,800
Wärmedurchlasswiderst. R_{bj} (d_{mj}/λ_{bj}) (m²K/W)	0,01	0,04	2,50	0,73	2,50	0,04
Wärmeleitwert λ_{cj} (W/mK)	0,800	0,110	0,110	0,110	0,110	0,110
Wärmedurchlasswiderst. R_{cj} (d_{mj}/λ_{bj}) (m²K/W)	0,01	0,27	1,82	0,73	1,82	0,27
Wärmeleitwert λ_{dj} (W/mK)	0,800	0,110	0,045	0,110	0,045	0,110
Wärmedurchlasswiderst. R_{cj} (d_{mj}/λ_{bj}) (m²K/W)	0,01	0,27	4,44	0,73	4,44	0,27
Wärmedurchlasswiderst. R_j	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_5
(1/(fa/Raj+fb/Rbj+fc/Rcj+fd/Rdj))						
(m²K/W)	0,01	0,04	2,51	0,97	2,51	0,04

Wärmedurchlasswiderstand innen R_{si}	0,13	m²K/W
Stark belüftete Luftschicht: Rse=Rsi	0,13	m²K/W
R''_T $(R_{si}+R_1+R_2+R_3+R_4+R_5+R_{se})$	6,35	m²K/W
Wärmedurchgangswiderst. R_T $((R'_T+R''_T)/2)$	**6,33**	**m²K/W**
Wärmedurchgangskoeffizient U $(1/R_T)$	**0,158**	**W/(m²K)**

Anhang III.6: Zur Berechnung des summierten Energiebedarfes E_{50} der untersuchten Strohballenkonstruktionen

1. Verwendete Formeln

1.1 Transmissionswärmebedarf H_t pro m² Bauteilfläche in Anlehnung an die EnEV

Ausgangsformel nach EnEV (vgl. Willems/Schild/Dinter 2006: 2.92)

$$H_T = \sum A_i \cdot U_i \cdot F_{xi} + 0{,}05A$$

Dabei ist:

- H_T: Transmissionswärmebedarf (W/K)
- A_i: Fläche des Bauteils i (m²)
- U_i: Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils i (W/m²K)
- F_{xi}: Temperaturkorrekturfaktor (-) (für Außenwände 1)
- 0,05A: Wärmebrückenkorrekturfaktor

Veränderte Formel

$$H_t = U_i$$

Dabei ist:

- H_t: Transmissionswärmebedarf pro m² (W/(m²K))
- U_i: Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils i (W/m²K)

Erläuterung: Betrachtet werden soll ausschnittsweise ein Quadratmeter einer bestimmten, wärmebrückenfreien Konstruktion gegen Außenluft. Damit wird erden A_i und F_{xi} 1, der Wärmebrückenkorrekturfaktor 0. Es ergibt sich die veränderte Formel.

1.2 Jahres-Transmissionswärmebedarf Q_T pro m² in Anlehnung an die EnEV

Ausgangsformel nach EnEV (vgl. Willems/Schild/Dinter 2006: 2.86)

$$Q_h = G_t \cdot (H_T + H_V) - 0{,}95 \cdot (Q_s + Q_i)$$

Dabei ist:

- Q_h: Jahres-Heizwärmebedarf (kWh/a)
- H_T: Transmissionswärmebedarf (W/K)
- H_V: Lüftungswärmebedarf (W/K)
- Q_s: Solare Wärmegewinne (kWh/a)
- Q_i: Interne Wärmegewinne (kWh/a)
- G_t: Heizgradstunden (kKh/a)

Veränderte Formel

$$Q_T = G_t \cdot U_i$$

Dabei ist:

- Q_T: Jahres-Transmissionswärmebedarf (kWh/(m²a))
- U_i: Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils i (W/(m²K))

G_t werden nach EnEV mit 66 kKh/a angenommen, zur Erläuterung siehe Hauptteil.

Erläuterung: Es soll der Transmissionswärmebedarf isoliert betrachtet werden. Damit werden sowohl die Lüftungswärmeverluste als auch die solaren und internen Gewinne 0 gesetzt. In Verbindung 1.1 ergibt sich die veränderte Formel.

1.4 Summierter Energiebedarf pro m² über von 50 Jahre E_{50}

$$E_{50} = PEI + 50 \cdot Q_T \cdot e_p$$

Dabei ist:

- E_{50}: Energiebedarf innerhalb von 50 Jahren (kWh/m²)
- PEI: Primärenergiebedarf (kWh/m²)
- Q_T: Jahres-Transmissionswärmebedarf (kWh/a)
- e_p: Anlagenaufwandszahl (-). Es wird die durchschnittliche Anlagenaufwandszahl für fossile Heizanlagen von 1,4 angesetzt

2. Berechnung des summierten Energiebedarfes über 50 Jahre

Nr.	System	PEI (kWh/m²)	U (W/(m²K))	Q_T (kWh/(m²a))	$Q_{T50}*e_p$ (kWh/m²)	E_{50} (kWh/m²)
1	Innenskelett HD-Ballen fl 48 cm (Putz-Putz)	58,8	0,16	10,29	721	779
1a	Innenskelett HD-Ballen fl 48 cm (Putz-Schalung)	70,1	0,15	10,21	715	785
2	Ballenbündigeskelett HD-Ballen fl 48 cm (Putz-Schalung)	69,6	0,15	10,21	715	784
3	Fugenorientiertes ballenbündiges Skelett Q-Ballen stehend 70 cm (Putz-Schalung)	49,0	0,07	4,82	337	386
3a	Fugenorientiertes ballenbündiges Skelett Q-Ballen stehend 90 cm (Putz-Schalung)	52,4	0,06	4,17	292	344
3b	Fugenorientiertes ballenbündiges Skelett Q-Ballen stehend 130 cm (Putz-Schalung)	60,2	0,04	2,62	183	243
4	Außenskelett HD-Ballen hl 36 cm (PutzSchalung)	59,9	0,14	9,14	640	700
5	Doppelskelett, HD-Ballen hl (Putz-Schalung)	47,2	0,14	9,08	635	683
6	Rahmensystem, HD-Ballen hl oder stehend 36 cm (Putz-Putz)	54,6	0,16	10,58	740	795
6a	Rahmensystem, HD-Ballen hl oder stehend (Putz-Schalung)	62,9	0,16	10,62	744	806
6b	Rahmensystem, Strohballeneinbau hochkant liegend oder stehend AbZ (OSB-Schalung)	95,8	0,14	9,43	660	756
7	Scheibentragwerk HD-Ballen hl od. stehend (Putz-Schalung)	94,7	0,12	8,19	573	668
8	System Gagné (Putz-Schalung)	94,3	0,70	46,32	3243	3337
9	Offenes System California Straw Bale Code (Putz/Schalung)	71,6	0,16	10,44	731	802
10	Offenes System: Gewölbekonstruktion (Putz-Schalung)	35,2	0,14	9,16	641	676
11	System Stroh Unlimited HD-Ballen fl 48 cm (Putz-Schalung)	64,9	0,16	10,43	730	795
12	System E+ 36 cm Stroh (Putz-Schalung)	82,3	0,14	9,40	658	740
12a	System E+ 70 cm Stroh (Putz-Schalung)	100,6	0,07	4,95	346	447
12b	System E+ 90 cm Stroh (Putz-Schalung)	110,4	0,06	3,87	271	381
12c	System E+ 130 cm Stroh (Putz-Schalung)	130,7	0,04	2,70	189	320
13	Lasttragend, Kriechen zugelassen 36 cm HD-Ballen (Putz/schalung)	51,7	0,14	9,40	658	709
14	Rahmensystem mit Mineralwolledämmung (Kunstharzputz/Schalung)	260,2				
15	KS-Wand mit EPS-Dämmung U 0,14 (Kalkputz/Kunstharzputz)	309,7	0,14	9,48	663	973
15a	KS-Wand mit EPS-Dämmung U 0,07 (Kalkputz/Kunstharzputz)	429,6	0,08	4,97	348	778
15b	KS-Wand mit EPS-Dämmung U 0,06 (Kalkputz/Kunstharzputz)	499,7	0,06	3,89	272	772
15c	KS-Wand mit EPS-Dämmung U 0,04 (Kalkputz/Kunstharzputz)	640,3	0,04	2,71	190	830

Anhang III.7: Zu den statischen Möglichkeiten und Grenzen lasttragender Strohballenkonstruktionen

1. Ermittlung von Flächen- und Linienlasten

1.1 Ermittlung der Flächenlast unterschiedlicher Dachkonstruktionen bei einer Neigung von 20°

Bauteil	Schichtdicke [m]	Raumlast [kN/m³]	Anteil	Flächenlast [kN/m²]	Flächenlast horizontal * 1/cos(20°)	Vorhanden in	Quelle
Schneelast (Zone III Höh: 400 m üNN * cos(20°))				0,94	0,94	1,2,3,4,5,6	Schneider 1998: 3.24
Substrat, feucht	0,15	12	1	1,80	1,92	1,4	Minke 2000: 28
Dachabdichtung				0,15	0,16	1,4	Schneider 1998: 3.9
Ziegeleindeckung einschließl. Lattung				0,55	0,59	2,5	Schneider 1998: 3.8
Faserzementwellplatte				0,20	0,21	3,6	Eternit 2006: 26
Unterspannbahn				0,02	0,02	2,3,5,6	Schneider 1998: 3.8
Dachlatte	0,03	5	0,1	0,02	0,02	1,3,4,6	Schneider 1998: 3.3
Lehmschlag	0,015	18	1	0,27	0,29	2,3,5,6	Schneider 1998: 3.3
Strohballen	0,36	1,1	0,94	0,37	0,40	1,2,3	
Sparren (2x6/18)	0,36	5	0,06	0,11	0,11	1,2,3	Schneider 1998: 3.3
Strohballen	0,36	1,1	0,88	0,35	0,37	4,5,6	
Sparren (2x6/18)	0,36	5	0,16	0,29	0,31	4,5,6	Schneider 1998: 3.3
OSB-Platte	0,02	6	1	0,12	0,13	1,2,3,4,5,6	Schneider 1998: 3.3
1. Gründach 1 m				**3,50**	**3,67**	1	
2. Betondachsteine 1 m				**2,38**	**2,47**	2	
3. Wellfaserzementdach 1 m				**2,04**	**2,12**	3	
4. Gründach 0,53 m				**3,66**	**3,84**	4	
5. Betondachsteine 0,53 m				**2,54**	**2,64**	5	
6. Wellfaserzementdach 0,53 m				**2,20**	**2,28**	6	

*Flächenlast horizontal=cos(20°)*Linienlast

1.2 Ermittlung der Flächenlast einer Holzbalkendecke 22/14

Bauteil	Schichtdicke [m]	Raumlast [kN/m³]	Anteil	Flächenlast [kN/m²]	Quelle

Verkehrslast				1,50	
Bodenbelag (Dielen)	0,022	5	1	0,11	Schneider 2002: 3.4
Holzweichfaserplatte	0,05	2,5	1	0,13	Schneider 2002: 3.4
Schüttung (Sand)	0,03	18	1	0,54	Schneider 1998: 3.3
Rieselschutzpapier				0,00	
Sichtschalung N+F	0,022	5	1	0,11	Schneider 2002: 3.4
Balken	0,22	5	0,14	0,15	Schneider 2002: 3.4
Summe				**2,54**	

Maximale Spannweite bei einem Meter Lasteinzugsbreite: 5 m

1.3 Ermittlung der Eigen- und Linienlasten von Strohballenwänden

				Strohdicke (m) 0,36	Stroh-dicke (m) 0,48	Stroh-dicke (m) 0,7	Stroh-dicke (m) 0,9	Stroh-dicke (m) 1,2	Stroh-dicke (m) 1,3	
Bauteil	**Raumlast [kN/m³]**	**Anteil**	**Schichtdicke [m]**	**Flächen-last [kN/m²]**	**Flächen-last [kN/m²]**	**Flächen-last [kN/m²]**	**Flächen-last [kN/m²]**	**Flächen-last [kN/m²]**	**Flächen-last [kN/m²]**	**Quelle**
Putz, mehrlagig	18	1	0,04	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	Schneider 2002: 3.4
Strohballen	1,2	1	0,36	0,43	0,576	0,84	1,08	1,44	1,56	
Putz, mehrlagig	18	1	0,04	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	Schneider 2002: 3.4
Summe				**1,87**	**2,02**	**2,28**	**2,52**	**2,88**	**3,00**	
Eigenlast bei einer Wandhöhe von 2,5 m			**kN/m**	**4,68**	**5,04**	**5,70**	**6,30**	**7,20**	**7,50**	
Eigenlast bei 1/3 Fensteröffnung:			**kN/m**	**3,12**	**3,36**	**3,80**	**4,20**	**4,80**	**5,00**	
Max. Linienlast bei 20 kN/m² und 1/3 Fensteröff			**kN/m**	**4,80**	**6,40**	**9,33**	**12,00**	**16,00**	**17,33**	

2. Spannweite bei 2-seitiger Belastung bei einer maximalen Spannung von 20 kN/m² und einer Dachneigung von 20°

2.1 Eingeschossig

Gleichung 1 Pzul=d*σmaxW mit
- Pzul: Maximal zulässige Wandlast
- d: Wanddicke (Stroh)
- σmaxW Maximale Spannung (20 kN/m³*(2/3))

Gleichung 2 D=qD*l mit
- D: Dachlast
- qD: Flächenlast Dach
- l: Wirklänge auf eine Wand

Bedingung: D=Pzul **Gleichsetzen:** qD*l=l*σmaxW **Umstellen und Kürzen:** l=(d*σmaxW)/qD

s=2*l mit s=Spannweite

Gleichung eingeschossig: s=(2*d*σmaxW)/qD

2.2 Zweigeschossig

Gleichung 2 P=(qD+qZ)*l+LW mit

- P: Last aus Dach, OG-Wand und Zwischendecke
- qD: Flächenlast Dach
- qZ: Flächenlast Zwischendecke
- LW Linienlast aus OG-Wand
- l: Seitenlänge des quadratischen Gebäudes

Bedingung: P=Pzul

Gleichsetzen: (qD+qZ)*l+LW=d*σmaxW

Umstellen und Kürzen: l=(d*σmaxW-LWand)/(qD+qZ)

s=2*l mit s=Spannweite

Gleichung zweigeschossig: s=((*d*σmaxW-LW)/(qD+qZ))*2

Wandbreite (1. Geschoss)	Spannweite s (m) 1 Geschoss Gründach	1 Geschoss Betondach-steine	1 Geschoss Wellfaser-zement-dach	2 Geschosse Gründach	2 Geschosse Betondach-steine	2 Geschosse Wellfaser-zement-dach	Maximale Linienlast (EG-Wand) bei 1/3 Fensteröffnungen
q bei 1 m (+ Decke)	3,67	2,47	2,12	6,21	5,01	4,65	
q bei 0,53 m (+Decke)	3,84	2,64	2,28				
				OG Wände aus 36 cm Stroh Ausnahmen: s.u.			
0,36	2,62	3,88	4,54	0,54	0,67	0,72	4,80
0,48	3,49	5,18	6,05	1,06	1,31	1,41	6,40
0,7	5,09	7,00	8,18	2,00	2,48	2,67	9,33
0,9	6,26	8,60	9,00	*2,78*	3,54	3,82	12,00
1,2	7,50	8,60	9,00	***3,93***	*5,04*	*5,43*	16,00
1,3	7,50	8,60	9,00	***4,36***	***5,40***	***5,81***	17,33

Sparrenabstand: 1 m — Sparrenabstand: 0,53 m

kursiv OG-Wand aus 0,48 m Stroh — ***krusiv+fett OG-Wand aus 0,7 m Stroh***

3. Spannweite bei 4-seitiger gleichmäßiger Belastung (quadratischer Grundriss):

3.1 Eingeschossig

Gleichung 1 Pzul=4*d*s*σmaxW mit

- Pzul: Maximal zulässige Wandlast
- d: Wanddicke (Stroh)

s: Seitenlänge des quadratischen Gebäudes
σmaxW Maximale Spannung (20 kN/m³*(2/3))

Gleichung 2 D=qD*s² mit
D: Dachlast
qD: Flächenlast Dach
s: Seitenlänge des quadratischen Gebäudes

Bedingung: D=Pzul **Gleichsetzen:** qD*s²=4*d*s*σmaxW **Umstellen und Kürzen:** s=(4*d*σmaxW)/qD

d	**qD**	**s**
0,36	2,28	8,4210526
0,7	3,67	10,17257

3.2 Zweigeschossig

Gleichung 2 P=(qD+qZ)*s²+LW*s mit
P: Last aus Dach, OG-Wand und Zwischendecke
qD: Flächenlast Dach
qZ: Flächenlast Zwischendecke
LW Linienlast aus OG-Wand
s: Seitenlänge des quadratischen Gebäudes

Bedingung: P=Pzul **Gleichsetzen:** (qD+qZ)*s²+LW*s=4*d*s*σmaxW **Umstellen und Kürzen:** s=(4*d*σmaxW-LW)/(qD+qZ)

d	qD	LW	qZ	s
0,9	2,28	3,12	2,54	9,31

3.3 Dreigeschossig

Gleichung 2 P=(qD+2*qZ)*s²+(LW1+LW2)*s mit
P: Last aus Dach, OG-Wand und Zwischendecke
qD: Flächenlast Dach
qZ: Flächenlast Zwischendecke
LW1 Linienlast aus 1. OG-Wand
LW2 Linienlast aus 2. OG-Wand
s: Seitenlänge des quadratischen Gebäudes

Bedingung: P=Pzul **Gleichsetzen:** (qD+qZ)*s²+LW*s=4*d*s*σmaxW
Umstellen und Kürzen: s=(4*d*σmaxW-LW1-LW2)/(qD+2*qZ)

d	qD	LW1 (0,9m)	LW2 (0,36m	qZ	s
1,3	2,12	4,20	3,12	2,54	8,62

Anhang III.8: Ermittlung des Heizwärmebedarfes der Beispielgebäude nach PHPP (Monatsverf.)

Passivhaus-Projektierung

ENERGIEKENNWERT HEIZWÄRME
MONATSVERFAHREN

(auf dieser Seite dargestellt werden die Heizzeitsummen des Monatsverfahrens)

Klima:	Standard Deutschland	Innentemperatur:	20 °C
Objekt:	Lasttragendes, eingeschossiges Strohballengebäude	Gebäudetyp/Nutzung:	Wohngebäude
Standort:		Energiebezugsfläche A_{EB}:	62,4 m²
spez. Kapazität:	204 Wh/(m²K) (Eingabe im Blatt "Sommer")		

	Bauteile	Temperaturzone	Fläche m²		U-Wert W/(m²K)		Red.Fak. Mon.		G_t kKh/a		kWh/a	pro m² Energie-bezugsfläche
1.	Außenwand Außenluft	A	76,5	*	0,142	*	1,00	*	89	=	971	
2.	Außenwand Erdreich	B		*		*	1,00	*		=		
3.	Dach/Decken Außenluft	A	82,1	*	0,153	*	1,00	*	89	=	1122	
4.	Bodenplatte	B	79,2	*	0,136	*	1,00	*	64	=	693	
5.		A		*		*	1,00	*		=		
6.		A		*		*	1,00	*		=		
7.		X		*		*	0,75	*		=		
8.	Fenster	A	20,9	*	0,846	*	1,00	*	89	=	1577	
9.	Außentür	A		*		*	1,00	*		=		
10.	Wbrücken außen (Länge/m)	A		*		*	1,00	*		=		
11.	Wbrücken Perimeter (Länge/m)	P		*		*	1,00	*		=		
12.	Wbrücken Boden (Länge/m)	B		*		*	1,00	*		=		
	Transmissionswärmeverluste Q_T									Summe	4364	69,9 kWh/(m²a)

	A_{EB} m²		lichte Raumhöhe m		m³
wirksames Luftvolumen V_L	62	*	2,50	=	156

	$n_{L,Anlage}$ 1/h		$\eta^*_{EWÜ}$		η_{WRG}		$n_{L,Rest}$ 1/h		$n_{L,äqui\ Anteil}$ 1/h
wirksamer Luftwechsel außen $n_{L,e}$	0,394	*(1-	0%	)*(1-	0,92	)+	0,042	=	0,074
wirksamer Luftwechsel Erdreich $n_{L,g}$	0,394	*	0%	*(1-	0,92	)		=	0,000

	V_L m³		$n_{L,äqui\ Anteil}$ 1/h		c_{Luft} Wh/(m³K)		G_t kKh/a		kWh/a	kWh/(m²a)
Lüftungsverlust außen $Q_{L,a}$	156	*	0,074	*	0,33	*	89	=	339	5,4
Lüftungsverlust Erdreich $Q_{L,e}$	156	*	0,000	*	0,33	*	64	=	0	0,0
Lüftungswärmeverluste Q_L								Summe	339	5,4

		Q_T kWh/a		Q_L kWh/a		Reduktionsfaktor Nacht-/Wochenend-absenkung		kWh/a	kWh/(m²a)
Summe Wärmeverluste Q_V	(	4364	+	339	) *	1,0	=	4702	75,3

	Ausrichtung der Fläche	Abminderungsfaktor vgl. Blatt Fenster		g-Wert (senkr. Einstr.)		Fläche m²		Globalstrahlung kWh/(m²a)		kWh/a	kWh/(m²a)
1.	Nord	0,33	*	0,52	*	3,6	*	203	=	127	
2.	Ost	0,36	*	0,52	*	5,1	*	338	=	327	
3.	Süd	0,38	*	0,52	*	6,4	*	518	=	655	
4.	West	0,37	*	0,52	*	5,7	*	349	=	388	
5.	Horizontal	0,40	*	0,00	*	0,0	*	551	=	0	
6.	Summe opake Flächen									0	
	Wärmeangebot Solarstrahlung Q_S								Summe	1497	24,0

	kh/d		Länge Heizzeit d/a		spezif. Leistung q_I W/m²		A_{EB} m²		kWh/a	kWh/(m²a)
Innere Wärmequellen Q_I	0,024	*	273	*	2,1	*	62,4	=	859	13,8

			kWh/a	kWh/(m²a)
Freie Wärme Q_F	$Q_S + Q_I$	=	2356	37,7
Verhältnis Freie Wärme zu Verlusten	Q_F / Q_V	=	0,50	
Nutzungsgrad Wärmegewinne η_G		=	93%	
Wärmegewinne Q_G	$\eta_G * Q_F$	=	2190	35,1
Heizwärmebedarf Q_H	$Q_V - Q_G$	=	2512	**40,2**

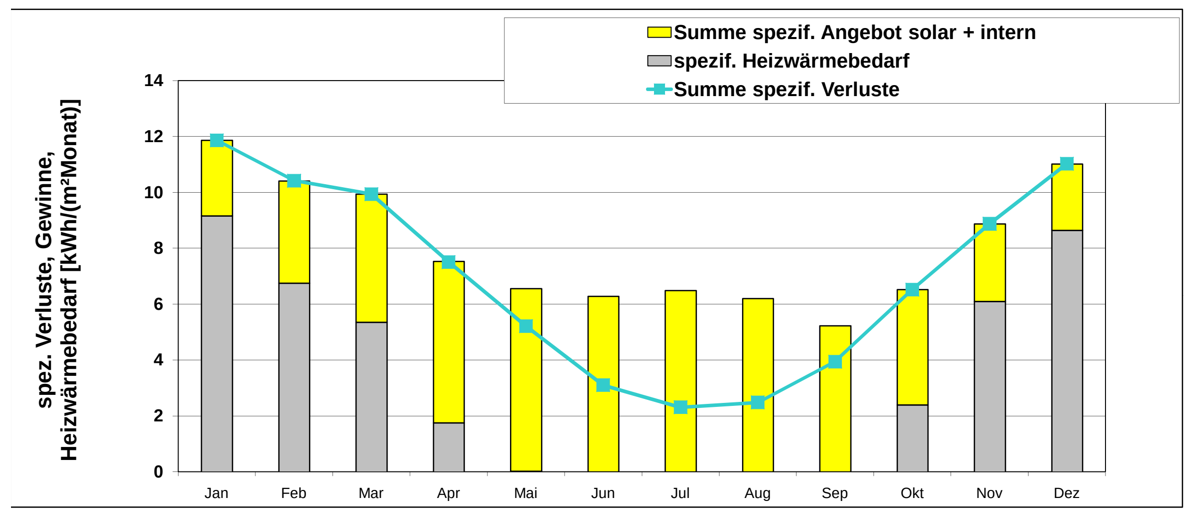
	kWh/(m²*a)		(ja/nein)
Grenzwert	15	**Anforderung erfüllt?**	**nein**

PASSIVHAUS-PROJEKTIERUNG

ENERGIEKENNWERT HEIZWÄRME
MONATSVERFAHREN

Klima:	Standard Deutschland	Innentemperatur:	20	°C
Objekt:	Lasttragendes, eingeschossiges Strohballengebäude	Gebäudetyp/Nutzung:	Wohngebäude	
Standort:		Energiebezugsfläche A_{EB}:	62	m²

	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr	
Heizgr.Std. Außen	14,6	12,6	11,6	8,4	5,3	2,7	1,8	2,2	4,4	7,9	11,0	13,7	96	kKh
Heizgr.Std. Grund	8,0	8,1	9,3	8,7	8,2	6,9	6,0	5,1	4,6	5,0	5,6	6,9	82	kKh
Verluste Außen	654	564	521	375	237	120	80	100	197	354	494	614	4309	kWh
Verluste Grund	87	87	100	94	89	74	64	55	49	54	60	74	886	kWh
Summe spezif. Verluste	11,9	10,4	9,9	7,5	5,2	3,1	2,3	2,5	3,9	6,5	8,9	11,0	83,2	kWh/m²
Solare Gewinne Nord	6	9	16	23	31	34	34	27	19	11	6	4	223	kWh
Solare Gewinne Ost	13	25	40	65	80	78	80	73	50	31	15	9	559	kWh
Solare Gewinne Süd	37	75	84	105	108	96	101	109	101	80	40	27	962	kWh
Solare Gewinne West	16	31	49	73	91	89	92	81	61	38	18	11	650	kWh
Solare Gewinne Horiz.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	kWh
Solare Gewinne opak	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	kWh
Innere Wärmequellen	98	88	98	94	98	94	98	98	94	98	94	98	1149	kWh
Summe spezif. Angebot s	2,7	3,7	4,6	5,8	6,5	6,3	6,5	6,2	5,2	4,1	2,8	2,4	56,7	kWh/m²
Nutzungsgrad	100%	100%	100%	100%	79%	49%	36%	40%	75%	100%	100%	100%	76%	
Heizwärmebedarf	572	422	335	110	2	0	0	0	1	150	381	540	2512	kWh
spezif. Heizwärmebedarf	**9,2**	**6,8**	**5,4**	**1,8**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**2,4**	**6,1**	**8,6**	**40,2**	kWh/m²



Heizwärmebedarf: Vergleich

EN 13790 Monatsverfahren	**2512**	**kWh/a**	**40,2**	**kWh/(m²a) Bezugsfläche ist die Wohnfläche**
PHPP, Heizperiodenverfahren	**2626**	**kWh/a**	**42,1**	**kWh/(m²a) Bezugsfläche ist die Wohnfläche**
Wert EnEV	**877**	**kWh/a**	**10,4**	**kWh/(m²a) Achtung! andere Bezugsfläche: A_N nach EnEV**

Monat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Ganzjahres-wert Summe	Heizperioden-verfahren
Tage	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365	225
AußenTemp	0,40	1,30	4,40	8,40	12,90	16,30	17,60	17,00	13,90	9,40	4,70	1,60	9,0	4,4
Strahl Nord	10,0	15,0	26,0	37,0	50,0	55,0	55,0	44,0	30,0	18,0	10,0	7,0	357	140
Strahl Ost	13,0	26,0	41,0	67,0	83,0	81,0	83,0	75,0	52,0	32,0	15,0	9,0	577	220
Strahl Süd	29,0	59,0	66,0	83,0	85,0	76,0	80,0	86,0	80,0	63,0	32,0	21,0	760	370
Strahl West	14,0	28,0	44,0	66,0	82,0	80,0	83,0	73,0	55,0	34,0	16,0	10,0	585	230
Strahl Hori	21,0	40,0	65,0	108,0	142,0	141,0	144,0	126,0	87,0	50,0	23,0	15,0	962	360
Thimm	-9,75	-9,55	-5,37	-2,01	4,26	8,79	11,19	11,37	7,76	2,32	-3,92	-7,42	0,7	
BodenTemp	9,19	8,02	7,53	7,86	8,93	10,44	11,99	13,17	13,66	13,32	12,26	10,75	10,6	10,0

Passivhaus-Projektierung

ENERGIEKENNWERT HEIZWÄRME
MONATSVERFAHREN

(auf dieser Seite dargestellt werden die Heizzeitsummen des Monatsverfahrens)

Klima:	Standard Deutschland	Innentemperatur:	20 °C
Objekt:	Hybrides, zweigeschossiges Strohballengebäude	Gebäudetyp/Nutzung:	Wohngebäude
Standort:		Energiebezugsfläche A_{EB}:	343,0 m²
spez. Kapazität:	204 Wh/(m²K) (Eingabe im Blatt "Sommer")		

Nr.	Bauteile	Temperaturzone	Fläche m²		U-Wert W/(m²K)		Red.Fak. Mon.		G_t kKh/a		kWh/a	pro m² Energie-bezugsfläche
1.	Außenwand Außenluft	A	353,0	*	0,065	*	1,00	*	80	=	1830	
2.	Außenwand Erdreich	B		*		*	1,00	*		=		
3.	Dach/Decken Außenluft	A	257,5	*	0,136	*	1,00	*	80	=	2791	
4.	Bodenplatte	B	232,0	*	0,072	*	1,00	*	52	=	861	
5.		A		*		*	1,00	*		=		
6.		A		*		*	1,00	*		=		
7.		X		*		*	0,75	*		=		
8.	Fenster	A	87,5	*	0,817	*	1,00	*	80	=	5698	
9.	Außentür	A		*		*	1,00	*		=		
10.	Wbrücken außen (Länge/m)	A		*		*	1,00	*		=		
11.	Wbrücken Perimeter (Länge/m)	P		*		*	1,00	*		=		
12.	Wbrücken Boden (Länge/m)	B		*		*	1,00	*		=		

Transmissionswärmeverluste Q_T — Summe 11180 kWh/a — 32,6 kWh/(m²a)

	A_{EB} m²		lichte Raumhöhe m		m³
wirksames Luftvolumen V_L	343	*	2,50	=	858

	$n_{L,Anlage}$ 1/h		$\eta^*_{EWÜ}$		η_{WRG}		$n_{L,Rest}$ 1/h		$n_{L,äqui\ Anteil}$ 1/h
wirksamer Luftwechsel außen $n_{L,e}$	0,300	*(1-	0%	)*(1-	0,92	)+	0,042	=	0,066
wirksamer Luftwechsel Erdreich $n_{L,g}$	0,300	*	0%	*(1-	0,92	)		=	0,000

	V_L m³		$n_{L,äqui\ Anteil}$ 1/h		c_{Luft} Wh/(m³K)		G_t kKh/a		kWh/a	kWh/(m²a)
Lüftungsverlust außen $Q_{L,a}$	858	*	0,066	*	0,33	*	80	=	1489	4,3
Lüftungsverlust Erdreich $Q_{L,e}$	858	*	0,000	*	0,33	*	52	=	0	0,0

Lüftungswärmeverluste Q_L — Summe 1489 — 4,3

		Q_T kWh/a		Q_L kWh/a		Reduktionsfaktor Nacht-/Wochenend-absenkung		kWh/a	kWh/(m²a)
Summe Wärmeverluste Q_V	(	11180	+	1489	) *	1,0	=	12669	36,9

Nr.	Ausrichtung der Fläche	Abminderungsfaktor vgl. Blatt Fenster		g-Wert (senkr. Einstr.)		Fläche m²		Globalstrahlung kWh/(m²a)		kWh/a
1.	Nord	0,37	*	0,52	*	17,9	*	123	=	422
2.	Ost	0,40	*	0,52	*	18,3	*	203	=	766
3.	Süd	0,40	*	0,52	*	30,6	*	353	=	2274
4.	West	0,40	*	0,52	*	18,3	*	212	=	800
5.	Horizontal	0,38	*	0,52	*	2,3	*	322	=	144
6.	Summe opake Flächen									0

Wärmeangebot Solarstrahlung Q_S — Summe 4405 kWh/a — 12,8 kWh/(m²a)

	kh/d		Länge Heizzeit d/a		spezif. Leistung q_I W/m²		A_{EB} m²		kWh/a	kWh/(m²a)
Innere Wärmequellen Q_I	0,024	*	212	*	2,1	*	343,0	=	3665	10,7

			kWh/a	kWh/(m²a)
Freie Wärme Q_F	Q_S + Q_I	=	8071	23,5
Verhältnis Freie Wärme zu Verlusten	Q_F / Q_V	=	0,64	
Nutzungsgrad Wärmegewinne η_G		=	95%	
Wärmegewinne Q_G	η_G * Q_F	=	7666	22,3
Heizwärmebedarf Q_H	Q_V - Q_G	=	5003	**14,6**

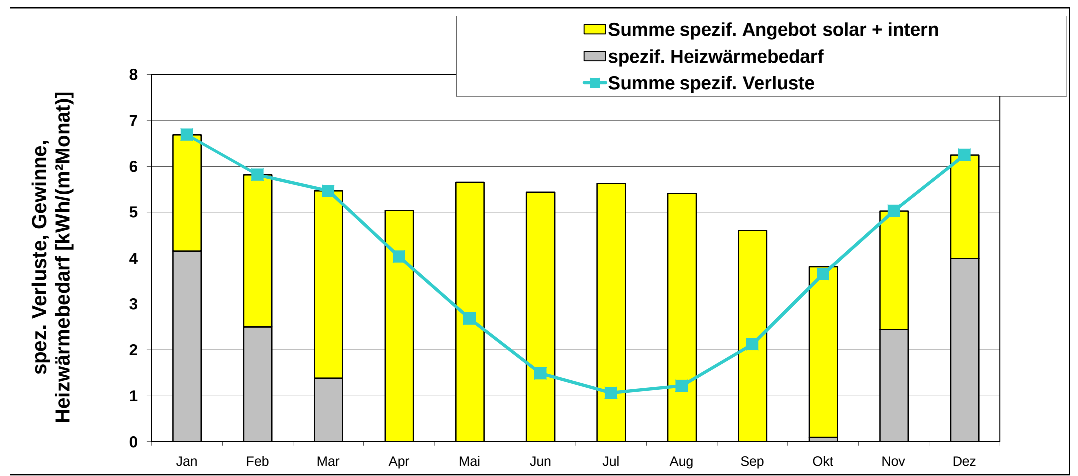
Grenzwert 15 kWh/(m²a) — **Anforderung erfüllt?** (ja/nein) **ja**

PASSIVHAUS-PROJEKTIERUNG

E N E R G I E K E N N W E R T H E I Z W Ä R M E
M O N A T S V E R F A H R E N

Klima:	Standard Deutschland	Innentemperatur:	20 °C
Objekt:	Hybrides, zweigeschossiges Strohballengebäude	Gebäudetyp/Nutzung:	Wohngebäude
Standort:		Energiebezugsfläche A_{EB}:	343 m²

	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr	
Heizgr.Std. Außen	14,6	12,6	11,6	8,4	5,3	2,7	1,8	2,2	4,4	7,9	11,0	13,7	96	kKh
Heizgr.Std. Grund	8,0	8,1	9,3	8,7	8,2	6,9	6,0	5,1	4,6	5,0	5,6	6,9	82	kKh
Verluste Außen	2160	1862	1720	1237	783	395	265	331	651	1168	1632	2028	14231	kWh
Verluste Grund	134	135	155	146	138	115	100	85	76	83	93	115	1374	kWh
Summe spezif. Verluste	6,7	5,8	5,5	4,0	2,7	1,5	1,1	1,2	2,1	3,6	5,0	6,2	45,5	kWh/m²
Solare Gewinne Nord	34	51	89	127	171	188	188	151	103	62	34	24	1223	kWh
Solare Gewinne Ost	49	98	155	253	313	306	313	283	196	121	57	34	2177	kWh
Solare Gewinne Süd	187	380	425	535	548	490	515	554	515	406	206	135	4895	kWh
Solare Gewinne West	53	106	166	249	309	302	313	275	208	128	60	38	2208	kWh
Solare Gewinne Horiz.	9	18	29	48	63	63	64	56	39	22	10	7	430	kWh
Solare Gewinne opak	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	kWh
Innere Wärmequellen	536	484	536	519	536	519	536	536	519	536	519	536	6310	kWh
Summe spezif. Angebot s	2,5	3,3	4,1	5,0	5,7	5,4	5,6	5,4	4,6	3,7	2,6	2,3	50,3	kWh/m²
Nutzungsgrad	100%	100%	100%	80%	47%	27%	19%	22%	46%	96%	100%	100%	61%	
Heizwärmebedarf	1426	859	475	1	0	0	0	0	0	34	839	1370	5003	kWh
spezif. Heizwärmebedarf	**4,2**	**2,5**	**1,4**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,1**	**2,4**	**4,0**	**14,6**	kWh/m²



Heizwärmebedarf: Vergleich

EN 13790 Monatsverfahren	**5003**	**kWh/a**	**14,6**	**kWh/(m²a) Bezugsfläche ist die Wohnfläche**
PHPP, Heizperiodenverfahren	**5101**	**kWh/a**	**14,9**	**kWh/(m²a) Bezugsfläche ist die Wohnfläche**
Wert EnEV	**5788**	**kWh/a**	**10,2**	**kWh/(m²a) Achtung! andere Bezugsfläche: A_N nach EnEV**

Monat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Ganzjahres-wert Summe	Heizperioden-verfahren
Tage	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365	225
AußenTemp	0,40	1,30	4,40	8,40	12,90	16,30	17,60	17,00	13,90	9,40	4,70	1,60	9,0	4,4
Strahl Nord	10,0	15,0	26,0	37,0	50,0	55,0	55,0	44,0	30,0	18,0	10,0	7,0	357	140
Strahl Ost	13,0	26,0	41,0	67,0	83,0	81,0	83,0	75,0	52,0	32,0	15,0	9,0	577	220
Strahl Süd	29,0	59,0	66,0	83,0	85,0	76,0	80,0	86,0	80,0	63,0	32,0	21,0	760	370
Strahl West	14,0	28,0	44,0	66,0	82,0	80,0	83,0	73,0	55,0	34,0	16,0	10,0	585	230
Strahl Hori	21,0	40,0	65,0	108,0	142,0	141,0	144,0	126,0	87,0	50,0	23,0	15,0	962	360
Thimm	-9,75	-9,55	-5,37	-2,01	4,26	8,79	11,19	11,37	7,76	2,32	-3,92	-7,42	0,7	
BodenTemp	9,19	8,02	7,53	7,86	8,93	10,44	11,99	13,17	13,66	13,32	12,26	10,75	10,6	10,0

Passivhaus-Projektierung

ENERGIEKENNWERT HEIZWÄRME
MONATSVERFAHREN

(auf dieser Seite dargestellt werden die Heizzeitsummen des Monatsverfahrens)

Klima:	Standard Deutschland	Innentemperatur:	20 °C
Objekt:	NLT Strohballen Doppelhaus	Gebäudetyp/Nutzung:	Wohngebäude
Standort:		Energiebezugsfläche A_{EB}:	363,3 m²
spez. Kapazität:	204 Wh/(m²K) (Eingabe im Blatt "Sommer")		

	Bauteile	Temperaturzone	Fläche m²		U-Wert W/(m²K)		Red.Fak. Mon.		G_t kKh/a		kWh/a	pro m² Energie-bezugsfläche
1.	Außenwand Außenluft	A	419,6	*	0,074	*	1,00	*	80	=	2462	
2.	Außenwand Erdreich	B		*		*	1,00	*		=		
3.	Dach/Decken Außenluft	A	260,6	*	0,070	*	1,00	*	80	=	1454	
4.	Bodenplatte	B	253,0	*	0,136	*	1,00	*	52	=	1773	
5.		A		*		*	1,00	*		=		
6.		A		*		*	1,00	*		=		
7.		X		*		*	0,75	*		=		
8.	Fenster	A	81,5	*	0,829	*	1,00	*	80	=	5382	
9.	Außentür	A		*		*	1,00	*		=		
10.	Wbrücken außen (Länge/m)	A		*		*	1,00	*		=		
11.	Wbrücken Perimeter (Länge/m)	P		*		*	1,00	*		=		
12.	Wbrücken Boden (Länge/m)	B		*		*	1,00	*		=		kWh/(m²a)
	Transmissionswärmeverluste Q_T									Summe	11072	30,5

	A_{EB} m²		lichte Raumhöhe m		m³
wirksames Luftvolumen V_L	363	*	2,50	=	908

	$n_{L,Anlage}$ 1/h		$\eta^*_{EWÜ}$		η_{WRG}		$n_{L,Rest}$ 1/h		$n_{L,äqui\ Anteil}$ 1/h
wirksamer Luftwechsel außen $n_{L,e}$	0,300	*(1-	0%	)*(1-	0,92	)+	0,042	=	0,066
wirksamer Luftwechsel Erdreich $n_{L,g}$	0,300	*	0%	*(1-	0,92	)		=	0,000

	V_L m³		$n_{L,äqui\ Anteil}$ 1/h		c_{Luft} Wh/(m³K)		G_t kKh/a		kWh/a	kWh/(m²a)
Lüftungsverlust außen $Q_{L,a}$	908	*	0,066	*	0,33	*	80	=	1577	4,3
Lüftungsverlust Erdreich $Q_{L,e}$	908	*	0,000	*	0,33	*	52	=	0	0,0
Lüftungswärmeverluste Q_L								Summe	1577	4,3

		Q_T kWh/a		Q_L kWh/a		Reduktionsfaktor Nacht-/Wochenend-absenkung		kWh/a	kWh/(m²a)
Summe Wärmeverluste Q_V	(	11072	+	1577	) *	1,0	=	12649	34,8

	Ausrichtung der Fläche	Abminderungsfaktor vgl. Blatt Fenster		g-Wert (senkr. Einstr.)		Fläche m²		Globalstrahlung kWh/(m²a)		kWh/a	kWh/(m²a)
1.	Nord	0,36	*	0,52	*	32,0	*	123	=	744	
2.	Ost	0,40	*	0,00	*	0,0	*	203	=	0	
3.	Süd	0,38	*	0,52	*	49,5	*	353	=	3425	
4.	West	0,40	*	0,00	*	0,0	*	212	=	0	
5.	Horizontal	0,40	*	0,00	*	0,0	*	322	=	0	
6.	Summe opake Flächen									0	
	Wärmeangebot Solarstrahlung Q_S								Summe	4169	11,5

	kh/d		Länge Heizzeit d/a		spezif. Leistung q_I W/m²		A_{EB} m²		kWh/a	kWh/(m²a)
Innere Wärmequellen Q_I	0,024	*	212	*	2,1	*	363,3	=	3882	10,7

			kWh/a	kWh/(m²a)
Freie Wärme Q_F	Q_S + Q_I	=	8051	22,2
Verhältnis Freie Wärme zu Verlusten	Q_F / Q_V	=	0,64	
Nutzungsgrad Wärmegewinne η_G		=	97%	
Wärmegewinne Q_G	η_G * Q_F	=	7836	21,6
Heizwärmebedarf Q_H	Q_V - Q_G	=	4813	**13,2**

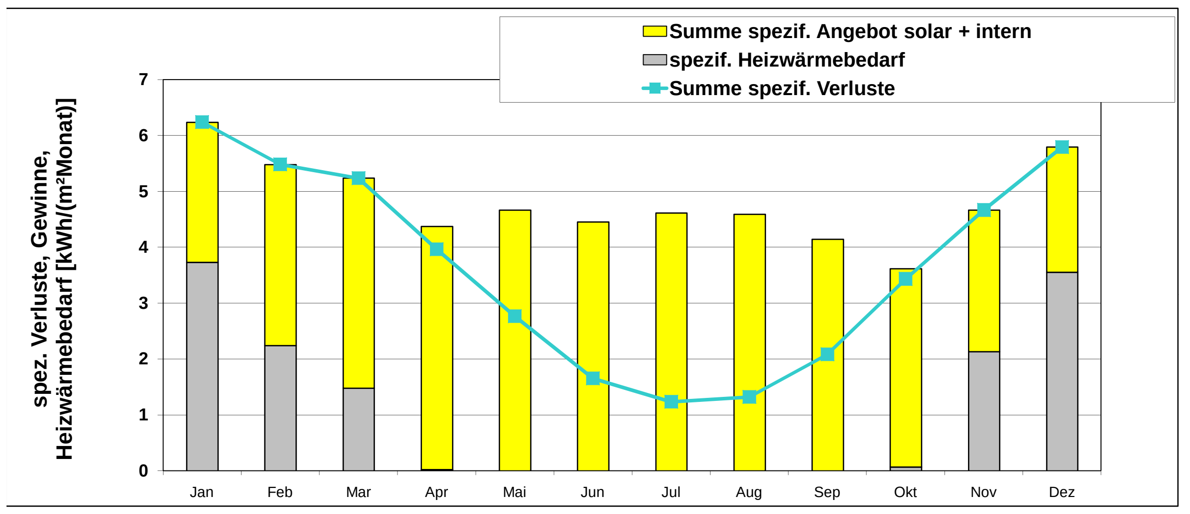
	kWh/(m²*a)		(ja/nein)
Grenzwert	15	**Anforderung erfüllt?**	**ja**

PASSIVHAUS-PROJEKTIERUNG

ENERGIEKENNWERT HEIZWÄRME
MONATSVERFAHREN

Klima:	Standard Deutschland	Innentemperatur:	20	°C
Objekt:	NLT Strohballen Doppelhaus	Gebäudetyp/Nutzung:	Wohngebäude	
Standort:		Energiebezugsfläche A_{EB}:	363	m²

	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr	
Heizgr.Std. Außen	14,6	12,6	11,6	8,4	5,3	2,7	1,8	2,2	4,4	7,9	11,0	13,7	96	kKh
Heizgr.Std. Grund	8,0	8,1	9,3	8,7	8,2	6,9	6,0	5,1	4,6	5,0	5,6	6,9	82	kKh
Verluste Außen	1990	1715	1584	1140	721	364	244	305	599	1076	1503	1868	13107	kWh
Verluste Grund	277	277	319	301	283	237	205	175	157	171	192	237	2831	kWh
Summe spezif. Verluste	6,2	5,5	5,2	4,0	2,8	1,7	1,2	1,3	2,1	3,4	4,7	5,8	43,9	kWh/m²
Solare Gewinne Nord	60	91	157	224	302	333	333	266	181	109	60	42	2160	kWh
Solare Gewinne Ost	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	kWh
Solare Gewinne Süd	281	572	640	805	825	737	776	834	776	611	310	204	7374	kWh
Solare Gewinne West	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	kWh
Solare Gewinne Horiz.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	kWh
Solare Gewinne opak	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	kWh
Innere Wärmequellen	568	513	568	549	568	549	568	568	549	568	549	568	6684	kWh
Summe spezif. Angebot s	2,5	3,2	3,8	4,3	4,7	4,5	4,6	4,6	4,1	3,5	2,5	2,2	44,6	kWh/m²
Nutzungsgrad	100%	100%	100%	91%	59%	37%	27%	29%	50%	95%	100%	100%	69%	
Heizwärmebedarf	1357	816	538	10	0	0	0	0	0	26	775	1291	4813	kWh
spezif. Heizwärmebedarf	**3,7**	**2,2**	**1,5**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,1**	**2,1**	**3,6**	**13,2**	kWh/m²



Heizwärmebedarf: Vergleich

EN 13790 Monatsverfahren	**4813**	**kWh/a**	**13,2**	**kWh/(m²a) Bezugsfläche ist die Wohnfläche**
PHPP, Heizperiodenverfahren	**5118**	**kWh/a**	**14,1**	**kWh/(m²a) Bezugsfläche ist die Wohnfläche**
Wert EnEV	**6341**	**kWh/a**	**10,7**	**kWh/(m²a) Achtung! andere Bezugsfläche: A_N nach EnEV**

Monat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Ganzjahres-wert Summe	Heizperioden-verfahren
Tage	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365	225
AußenTemp	0,40	1,30	4,40	8,40	12,90	16,30	17,60	17,00	13,90	9,40	4,70	1,60	9,0	4,4
Strahl Nord	10,0	15,0	26,0	37,0	50,0	55,0	55,0	44,0	30,0	18,0	10,0	7,0	357	140
Strahl Ost	13,0	26,0	41,0	67,0	83,0	81,0	83,0	75,0	52,0	32,0	15,0	9,0	577	220
Strahl Süd	29,0	59,0	66,0	83,0	85,0	76,0	80,0	86,0	80,0	63,0	32,0	21,0	760	370
Strahl West	14,0	28,0	44,0	66,0	82,0	80,0	83,0	73,0	55,0	34,0	16,0	10,0	585	230
Strahl Hori	21,0	40,0	65,0	108,0	142,0	141,0	144,0	126,0	87,0	50,0	23,0	15,0	962	360
Thimm	-9,75	-9,55	-5,37	-2,01	4,26	8,79	11,19	11,37	7,76	2,32	-3,92	-7,42	0,7	
BodenTemp	9,19	8,02	7,53	7,86	8,93	10,44	11,99	13,17	13,66	13,32	12,26	10,75	10,6	10,0